

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA INFORMATIKY

**POČÍTAČOVÝ NÁVRH A SIMULACE PASIVNÍ
OPTICKÉ SÍTĚ V PROSTŘEDÍ OPTIWAVE**

**COMPUTER DESIGN AND SIMULATION OF
PASSIVE OPTICAL NETWORK IN OPTIWAVE
SOFTWARE**

2012

Jakub Kolář

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Kolář**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika
Téma: **Počítačový návrh a simulace pasivní optické sítě v prostředí Optiwave
Computer Design and Simulation of Passive Optical Network in
Optiwave Software**

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je provést teoretický rozbor modulačních formátů pro WDM-PON sítě a simulovat různé typy topologie WDM-PON sítí s různými typy modulačních formátů a porovnání mezi sebou s ohledem na chybovost, dostupnost přenosové šířky pásma, použitých prvků v topologii, dosah sítě apod. V závěru student provede animaci WDM-PON sítě v Adobe Flash.

1. Teoretický rozbor WDM-PON sítě a jejích modifikací.
2. Rozbor používaných modulačních formátů pro WDM-PON sítě.
3. Simulace WDM-PON sítě s různými druhy modulací v prostředí Optiwave Optisystem.
4. Zhodnocení a porovnání modulačních formátů pro WDM-PON sítě.
5. Vytvoření animací v softwarovém prostředí Adobe Flash.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky*. Vydání 1. Praha: Matfyzpress, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-01-4
- [2] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [3] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [4] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi při vypracování této bakalářské práce pomohli. Hlavní poděkování patří Ing. Janu Látalovi za jeho metodické vedení a také za cenné rady, které byly velice důležité pro vypracování této bakalářské práce. Také velice oceňuji jeho vstřícnost a profesionalitu při řešení problémů a dotazů, které se vyskytly. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu po celou dobu vypracovávání této práce.

Zvláštní poděkování patří také mým přátelům: Miroslavu Hefnerovi a Kateřině Jandekové

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 27. 4. 2012

.....
Podpis autora

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je prostudovat a poté simulovat použití různých typů modulačních formátů pro WDM-PON síť. Následně poukázat na výhody, popřípadě nevýhody jednotlivých modulací. Bakalářská práce je rozdělena na tři hlavní části, které vyplívají ze zadání.

V první části jsou shrnuty teoretické poznatky. Jsou zde popsány komponenty využívané při realizaci optické trasy. Dále je v této části popsána technologie WDM a také její modifikace. Také je v této části uveden teoretický rozbor používaných modulačních formátů pro WDM-PON síť. Jako poslední jsou v této části uvedeny a objasněny jevy, které ovlivňují kvalitu optického signálu. Tato první část je popisována v kapitolách 1 až 6.

Druhá část je zaměřena na praktickou simulaci v programu Optiwave Optisystem 10. V této části je detailně odůvodněno použití a nastavení jednotlivých prvků v návrhu WDM-PON sítě. Dále je zde také uvedeno nastavení prvků pro jednotlivé modulace. Také jsou zde uvedeny výsledky simulací pro jednotlivé modulace. Zde jsou uvedeny také parametry, které určují kvalitu přenosu signálu. Tato část je popsána v kapitolách 7 a 8.

Ve třetí části je popsáno prostředí grafického prostředí Adobe Flash. V této části práce jsou také ukázány náhledy na jednotlivé animace, které popisují princip WDM-PON sítě. Tato třetí část je popsána v kapitole 9.

KLÍČOVÁ SLOVA

WDM, WDM-PON, modulace, NRZ, RZ, DB, RZ-DPSK, NRZ DPSK, PON, pasivní optická síť, optické vlákno, MZ interferometr.

ABSTRACT

The topic of this bachelor thesis is to make a study of and then simulate the using of different types of modulation formats for WDM-PON networks. Then subsequently to point to the advantages and disadvantages of each individual form. The theses is divided into three principal parts which are outlined below.

In the first part deals with and sums up the theory. It describes the components used during the realisation of optical lines, followed by a description of WDM technology and its modifications. This section also gives a theoretical analysis the use of modulation formats for WDM-PON networks. The final sheds light on the effect which influence the quality of optical signals. Section one is covered in chapters one through six.

The second part focuses on a practical simulation of the Optiwave Optisystem 10 programme. It describes the usage and settings of the individual elements of the WDM-PON design network which is explained in detail. Then the settings for elements of individual modulation are outlined. Also mentioned are the results of the simulation of individual modulation. The parameters which determine the quality of signal transmission are also stated. Section two is covered in chapters seven and eight.

In third part there is a description of graphical interface of Adobe Flash. This part also shows previews of individual animations, which describe principles of the WDM-PON network. Section three is covered in chapter number nine.

KEY WORDS

WDM, WDM-PON, modulation, NRZ, RZ, DB, RZ-DPSK, NRZ DPSK, PON, passive optical network, optical fiber, MZ interferometer.

Úvod	10
1. Zařízení používané v optických sítích	11
1.1. Zdroje světla	11
1.1.1. Luminiscenční diody (LED)	11
1.1.2. Laserové polovodičové zdroje (LD)	11
1.2. Zařízení pro zesílení signálu	11
1.2.1. EDFA zesilovač	12
1.2.2. SOA zesilovač	14
1.3. Detekce světla	15
1.3.1. PIN fotodioda	16
1.3.2. APD fotodioda	16
1.4. Vlnovodné routery AWG	17
1.4.1. Multiplexer a demultiplexer AWG a jejich princip	18
1.4.2. Směrovače AWG a jejich princip	19
2. Optická síť WDM–PON a její modifikace	20
2.1. WDM-PON	20
2.1.1. WWDM	21
2.1.2. CWDM	22
2.1.3. DWDM	22
2.2. WDM-PON s pevně přiřazenými individuálními vlnovými délkami	23
2.3. WDM-PON s využitím směrové odbočnice typu AWG místo pasivního rozbočovače	24
2.4. WDM-PON s kaskádním zapojením AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů	25
2.5. WDM-TDM PON	26
2.6. Long Reach PON	27
2.7. Super PON	28
3. Rozbor optického systému a prvků používaných pro vytváření modulací	30
3.1. Základní popis optického systému	30
3.2. Kódy v optických systémech	31
3.2.1. Linkové kódy	31
3.2.2. Transportní kódy	31
3.3. Koherentní optické systémy a zařízení v nich používané	32
3.3.1. Optické vysílače	32
3.3.2. Optický přijímač	32

3.4.	Modulátory	33
3.4.1.	Elektroabsorpční modulátor EAM.....	33
3.4.2.	Mach-Zehnder modulátor (MZM).....	34
4.	Metody modulace optického záření	36
4.1.	Modulace	36
4.1.1.	Amplitudová modulace	36
4.1.2.	Frekvenční modulace	39
4.1.3.	Fázová modulace.....	40
5.	Modulační formáty.....	41
5.1.	NRZ OOK modulace	41
5.2.	RZ OOK modulace	42
5.3.	CSRZ modulace.....	44
5.4.	CRZ modulace.....	45
5.5.	DB modulace	45
5.6.	BPSK modulace.....	46
5.7.	QPSK modulace	47
5.8.	DQPSK modulace.....	48
5.9.	DPSK modulace	49
5.10.	RZ-DPSK modulace	50
5.11.	NRZ-DPSK modulace.....	51
6.	Jevy negativně ovlivňující přenos signálu v optických sítích.....	53
6.1.	Útlum optických vláken.....	53
6.1.1.	Ztráty absorpcí	53
6.1.2.	Ztráta vyzařováním.....	53
6.1.3.	Ztráta rozptylem.....	53
6.1.4.	Ohybové ztráty.....	53
6.2.	Ztráty způsobené disperzí	54
6.2.1.	Módová disperze.....	54
6.2.2.	Chromatická disperze.....	54
6.2.3.	Polarizačně vidová disperze	54
6.3.	Nelineární jevy	54
6.3.1.	Materiálový rozptyl	54
6.3.2.	Ramanův rozptyl	55
6.3.3.	Brillouinův rozptyl	55

6.3.4.	Čtyřlínkové směřování	55
6.3.5.	Vlastní fázová modulace	55
6.3.6.	Křížová fázová modulace.....	55
7.	Rozbor návrhu WDM-PON sítě v programu Optiwave	56
7.1.	OLT jednotka	56
7.1.1.	Modulace signálu	56
7.1.2.	Demodulace signálu	59
7.2.	Přenosová trasa.....	59
7.3.	ONU jednotky.....	62
7.3.1.	Modulace signálu	62
7.3.2.	Demodulace signálu	63
8.	Zapojení a simulace jednotlivých modulací v programu Optiwave.....	64
8.1.	Sledované parametry	64
8.1.1.	Bitová chybovost	64
8.1.2.	Q-faktor	64
8.1.3.	Diagram oka	65
8.2.	Modulace NRZ.....	66
8.2.1.	Modulace signálu	66
8.2.2.	Demodulace signálu	67
8.2.3.	Výsledky simulací	67
8.3.	Modulace RZ 33%.....	69
8.3.1.	Modulace signálu	69
8.3.2.	Demodulace signálu	71
8.3.3.	Výsledky simulací	71
8.4.	Modulace RZ 50%.....	73
8.4.1.	Modulace signálu	73
8.4.2.	Demodulace signálu	74
8.4.3.	Výsledky simulací	74
8.5.	Modulace CSRZ 67%.....	76
8.5.1.	Modulace signálu	76
8.5.2.	Demodulace signálu	76
8.5.3.	Výsledky simulací	77
8.6.	Modulace CRZ	78
8.6.1.	Modulace signálu	78

8.6.2.	Demodulace signálu	79
8.6.3.	Výsledky simulací	80
8.7.	Modulace DB.....	81
8.7.1.	Modulace signálu	81
8.7.2.	Demodulace signálu	82
8.7.3.	Výsledky simulací	83
8.8.	Modulace NRZ-DPSK	84
8.8.1.	Modulace signálu	84
8.8.2.	Demodulace signálu	85
8.8.3.	Výsledky simulací	86
8.9.	Modulace RZ-DPSK.....	87
8.9.1.	Modulace signálu	87
8.9.2.	Demodulace signálu	88
8.9.3.	Výsledky simulací	89
9.	Animace v prostředí Macromedia Flash 8	91
9.1.	Pojem Flash	91
9.2.	Popis struktury prostředí	91
9.2.1.	Časová osa a vytváření vrstev	92
9.2.2.	Možnosti interakce.....	93
9.3.	Animace WDM-PON.....	94
Závěr	96	
Seznam použité literatury:	97	
Seznam zkratk.....	101	
Seznam obrázků.....	103	
Seznam tabulek	106	
Seznam příloh.....	106	

Úvod

V dnešním moderním světě je kladen neustálý tlak na zrychlování a zkvalitňování různých služeb. V počítačových sítích je tento tlak ještě více patrný než kdekoli jinde. Z toho důvodu dochází k stále většímu nasazování a budování optických sítí, nejen na páteřních linkách, ale i v sítích nižších hierarchií (přístupové sítě). Tyto optické sítě musí překlenout čím dál větší vzdálenosti a také se neustále zvedá jejich přenosová rychlost. Z těchto důvodů je důležité se zamýšlet, jaký multiplex a jakou modulaci v dané síti použijeme. Výběr správného typu multiplexu, spolu s výběrem správné modulace nám může dramaticky zlepšit překlenutou vzdálenost, ale také navýšit přenosovou rychlost. Proto se v této práci zaměříme na simulaci různých modulací a na jejich parametry při různých délkách a také při různých přenosových rychlostech. Tyto simulace budeme testovat na námi navrhnuté WDM-PON síti.

Dále v následujících kapitolách postupně probereme prvky používané v optických sítích. Vysvětlíme si princip WDM-PON sítě a následně si probereme některé její modifikace. V dalších kapitolách probereme teoreticky principy jednotlivých modulací a zaměříme se také na jevy, které negativně ovlivňují přenos signálu v optických sítích. Následně podrobně rozebereme praktický návrh WDM-PON sítě, která bude vytvořena v simulačním prostředí Optiwave Optisystem 10. V tomto prostředí si detailně popíšeme tvorbu jednotlivých modulací tak i následnou demodulaci a samozřejmě i výsledky jednotlivých modulací.

V poslední části této práce bude popsáno grafické prostředí Adobe Flash, které sloužilo pro vytvoření animací. Tyto animace sloužily pro grafické znázornění principu multiplexu WDM.

K této bakalářské práci je přiloženo CD, na kterém jsou umístěny soubory jednotlivých modulací, vytvořené v programu Optiwave Optisystem 10. Jsou zde umístěny kompletní výsledky z jednotlivých simulací. Dále jsou na CD uloženy i již zmiňované animace multiplexu WDM.

1. Zařízení používané v optických sítích

1.1. Zdroje světla

Zdroj světla nebo také záření je velmi důležitý prvek v optické síti. Charakteristika záření daného zdroje významně ovlivňuje výkonnost. Na zdroj světla se kladou v optických sítích velké nároky. Dobrý zdroj světla by měl mít celkově malé rozměry. Také by měl být pokud možno stabilní a monochromatický. Důležitý parametr zdroje světla je i jeho celková životnost. Měl by být i snadno zapojitelný na optické vlákno pro přenos generovaného záření.

V optických sítích se používají dva základní typy zdrojů záření. Tyto zdroje záření jsou luminiscenční diody (LED) a laserové polovodičové zdroje (LD). Oba tyto zdroje světla jsou velmi používané v telekomunikační oblasti[17].

1.1.1. Luminiscenční diody (LED)

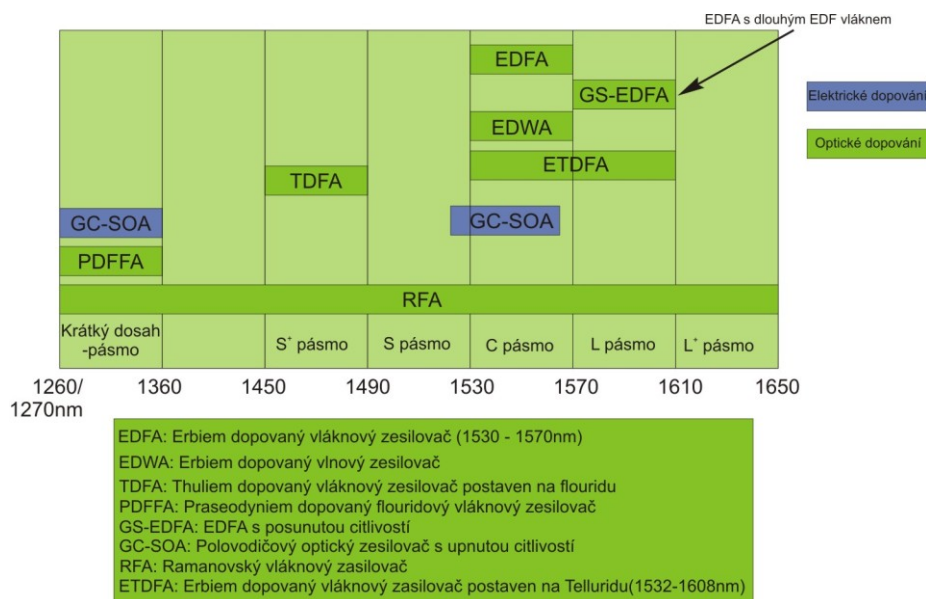
Tyto diody jsou levné a lehce dostupné. Vyznačují se dlouhou životností. Dobrá vlastnost těchto diod je, že se jednoduše modulují, avšak mají velkou divergenci výstupního svazku a také menší výkon a vyzařování v porovnání s LD. LED zdroje světla se hodí pro méně náročné aplikace a pro použití na kratších vzdálenostech. I v případě, kde není zapotřebí udržet směrovost optického svazku, najdou své uplatnění[17].

1.1.2. Laserové polovodičové zdroje (LD)

Laserové polovodičové zdroje mají větší vyzařovací výkon. Mají i menší spektrální šířku. Mezi jejich další výhody patří i to, že mají vysokou účinnost vazby na vlákno. Dále je možné modulovat zdroj záření do vyšších frekvencí. Samozřejmě i LD zdroje světla mají nevýhody. Jako příklad je možné zmínit jejich vyšší cenu. Vyžadují vyšší napájení a náročnější je i jejich teplotní stabilizace. LD zdroje světla se používají pro přenosy na větší vzdálenosti i tam, kde je nutnost vyzařovat světlo v úzkém svazku. Používají se i tam, kde je potřeba přenášet více vlnových délek například WDM [17].

1.2. Zařízení pro zesílení signálu

Pokud chceme šířit optický signál na větší vzdálenosti, nevyhneme se použití zesilovačů. Na tom, jak kvalitní bude signál má vliv například útlum, nelinearita, ale také disperze apod. Pokud do architektury naší optické sítě použijeme zesilovače, zvýší to rapidně dosah celé sítě. Kromě zesílení signálu umí zesilovače také obnovovat původní signál. Zesilovače mohou obnovit například tvar signálu nebo provést časovou opravu signálu. Zesilovače se dělí v základním rozdělení na polovodičové, mezi které patří SOA zesilovače. Dále na vláknové zesilovače, mezi které patří EDFA zesilovač a Ramanovské zesilovače, které pro zesílení signálu využívají stimulovaného Ramanova rozptylu. Na dalším obrázku (obr.1) jsou zobrazeny další typy zesilovačů a jejich parametry [16].



Obr. 1: Typy zesilovačů [24]

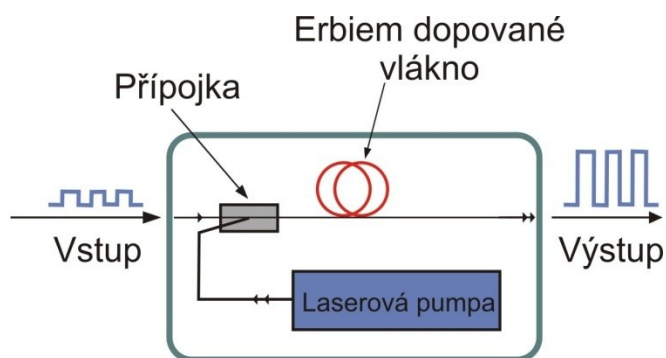
Proto, aby mohl zesilovač zesílit signál je nutný zdroj optické nebo elektrické energie. Každý zesilovač nejen, že signál do něho přicházející zesílí, ale také k němu přidá svůj šum. Tento šum je označován jako ASE (Amplified Spontaneous Emission). Výrobci jednotlivých zesilovačů se snaží šum co nejvíce snížit a proto má každý zesilovač jiné parametry ASE. Výstupní energie zesilovače je dána následujícím vzorcem [16]

$$E_{out}(t) = G \cdot E_{in}(t) + n(t), \quad (1.1)$$

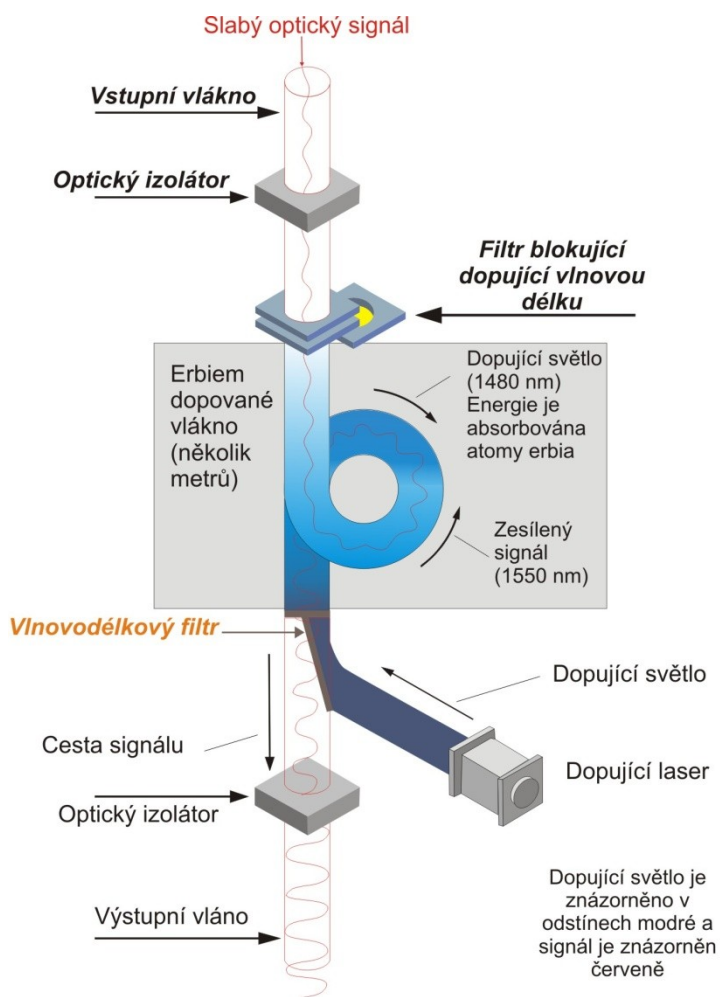
kde E_{out} je výstupní energie, E_{in} vstupní energie, G zesílení zesilovače a n jako přidávaný šum zesilovače (ASE). Tato rovnice je obecně platná pro všechny polovodičové i optické zesilovače [16].

1.2.1. EDFA zesilovač

EDFA zesilovač je tvořen hlavně laserovým zdrojem záření, v tomto případě se o takovém zdroji záření vyjadřujeme jako o laserové pumpě. Dalším důležitým prvkem těchto zesilovačů je také speciální optické vlákno, které je většinou dopováno prvky vzácných zemin například Erbium. U jiných typů zesilovačů se mohou objevit i jiné prvky například Ytterbium nebo Thulium. Princip funkce zesilovačů (EDFA) je následující. Laserová pumpa vyzařuje světlo na vlnových délkách 980 nm nebo 1480 nm. Toto světlo dále proudí do speciálního vlákna o délce až několika metrů. Díky laserové pumpě dochází v tomto vlákne k excitaci atomů erbia a to se dostává na vyšší energetickou hladinu. Energie se uvolní vlivem přítomnosti přenášeného signálu, jehož energie zapříčiňuje emisi záření o shodné vlnové délce a fázi s přenášeným signálem. Tímto principem dochází k žádanému zesílení optického signálu. Pro lepší představu o fungování EDFA zesilovačů je zde také následující obrázek (Obr.2) a (Obr.3) [6][7].



Obr. 2: Schéma EDFA optického zesilovače [17]



Obr. 3: Principiální schéma znázorňující fungování EDFA optického zesilovače [6]

Dále je i u tohoto typu zesilovače důležité, aby měl co nejnižší vlastní šum (ASE). Šum u tohoto zesilovače se vypočítá vzorcem [16].

$$P_{ASE}^{out} \cong 2n_{sp} h\nu(G-1)\Delta B, \quad (1.2)$$

kde:

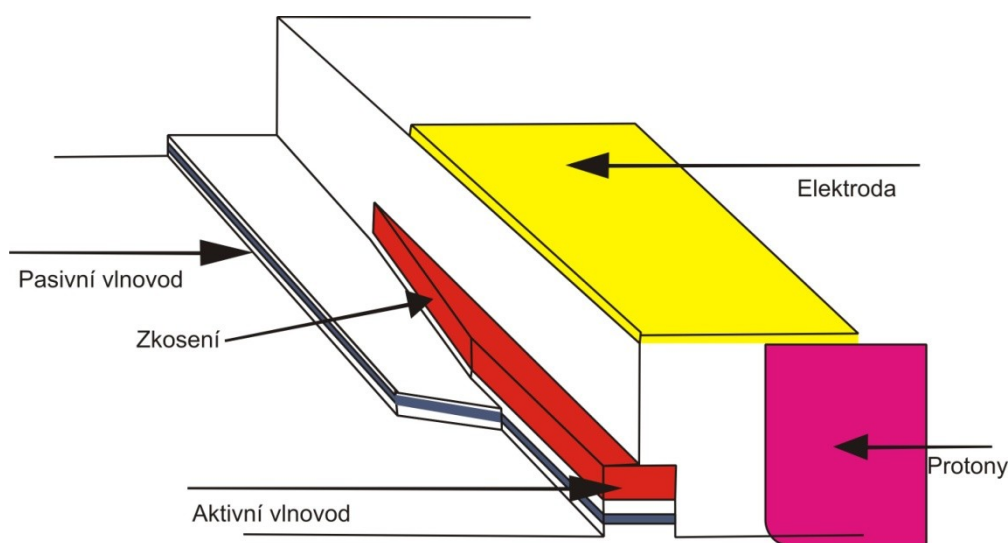
- $\eta_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$ je činitel spontánní emise [-],
- h je Planckova konstanta [$m^2 \times kg \times s^{-1}$],
- ν je kmitočet optické nosné [Hz],
- G zesílení EDFA zesilovače[-],
- B je šířka optického pásma, ve kterém měříme šum [Hz].

Šumový činitel EDFA je definován $F \approx 2n_{sp}$ a nejmenší teoretická hodnota je 2 dB. Obvykle se hodnota šumu pohybuje v rozmezí od 4 do 5 dB [16].

1.2.2. SOA zesilovač

SOA je polovodičový optický zesilovač a je založen na podobné struktuře jako Fabry-Perot laserová dioda. Rozdíl je v tom, že SOA má anti-reflexní prvky na čelních stranách.

SOA zesilovače jsou levnější než zesilovače EDFA. Některé SOA zesilovače mohou mít v sobě integrovány polovodičové lasery a modulátory apod. SOA má vyšší šum než EDFA zesilovače. Také nemá tak velký zesilovací zisk. SOA ústřední závislost na polarizaci a vysokou nelinearitu s vysokým přechodovým časem. Nelinearita znamená nejzávažnější problém pro optický přenos signálu. SOA zesilovače jsou vhodné pro zpracování optického signálu, například v kompletních optických přepínačích. Na obrázku (obr.4) níže můžeme vidět vyobrazení struktury SOA zesilovače [16].



Obr. 4: Znáznornění struktury zesilovače SOA [32]

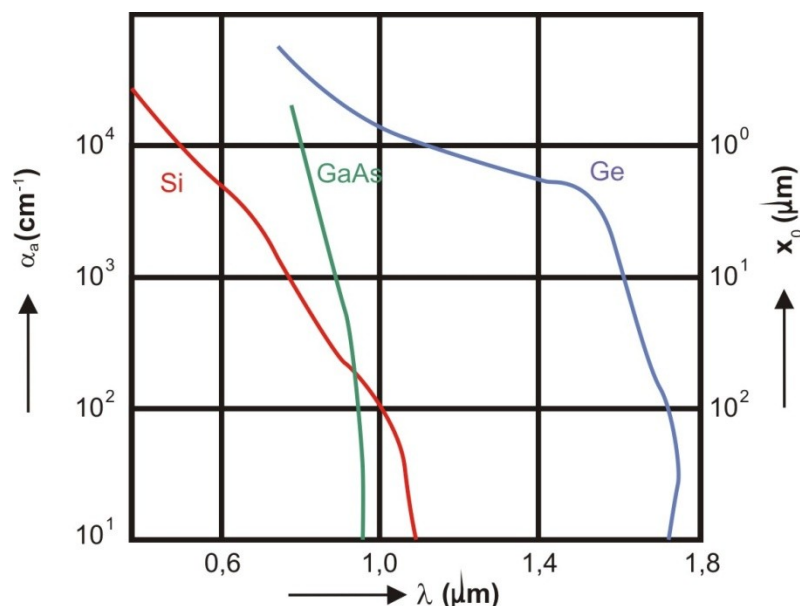
1.3. Detekce světla

Když signál projde celou trasou optického vedení, je nutné jej opět zachytit pro další zpracování. Pro detekci záření se používají takzvané detektory. Tyto detektory musí splňovat určité vlastnosti. Například musí mít malý vlastní šum. Také musí mít rychlou časovou odezvu a musí zabezpečit dostatečnou šířku přenášeného kmitočtového pásma. Dále by neměly být příliš citlivé na teplotní změny, změny tlaku nebo změny napájecího napětí. Mezi nejpoužívanější detektory záření se používají PIN a APD fotodiody. V optických sítích se využívají většinou PIN fotodiody [17].

Princip detekce záření spočívá v oddělování elektronů a děr, které se tvoří vlivem dopadajícího světelného záření. Jak moc je světlo pohlceno, závisí na materiálu, který byl použit. Mezi nejčastěji používané materiály patří Ge, Si, GaAs, InGaAsP a InGaAs. Hloubka vniku x_0 a koeficient absorpce světla α_a je vyjádřena následujícím vzorcem [17].

$$x_0 = \frac{1}{\alpha_a} \quad (1.3)$$

Dále je tento vztah vyjádřen také na následujícím obrázku (obr.5).



Obr. 5: Graf znázorňující absorpci a pohltivost pro různé materiály detektorů [17]

Důležitým vztahem je vyjádření průběhů pohlcení světla. Ten je dán vzorcem [17].

$$P(x) = (1 - R)P_0(1 - e^{-\alpha_a x}) \quad (1.4)$$

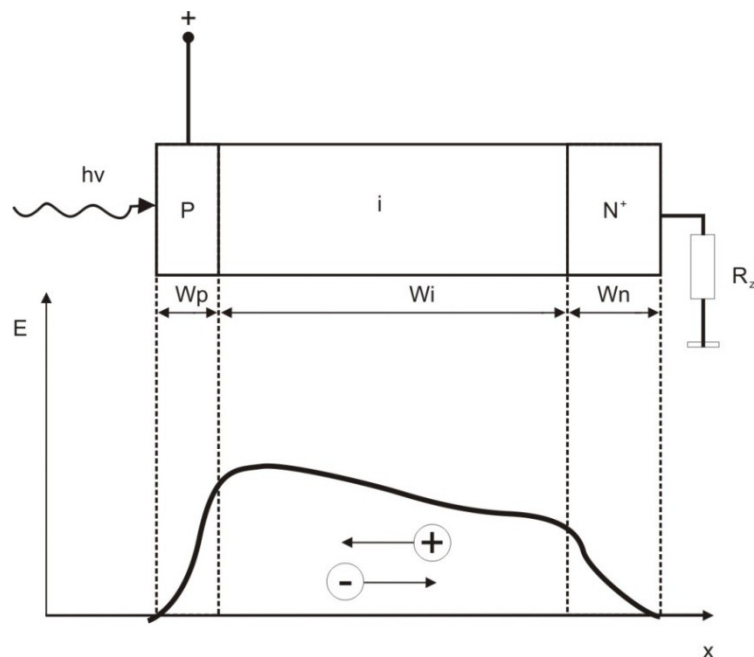
Kde R je velikost světla odražená povrchem detektoru záření. Při velkém odrazu světlo neproniká do detektoru záření a snižuje se tak jeho účinnost. Dále je zmíněno jednotlivě o PIN a pak o APD fotodiodě [17].

1.3.1. PIN fotodioda

Patří mezi základní detekční prvky a je proto hodně využívána v telekomunikační technice. Její výroba je v porovnání s APD fotodiodou mnohem méně nákladná. PIN fotodioda se skládá z tří částí.

- Silně legované vrstvy P o síle W_p ,
- Silně legované vrstvy N o síle W_n ,
- Slabě legované prostřední vrstvy i, která má vodivost typu P nebo N.

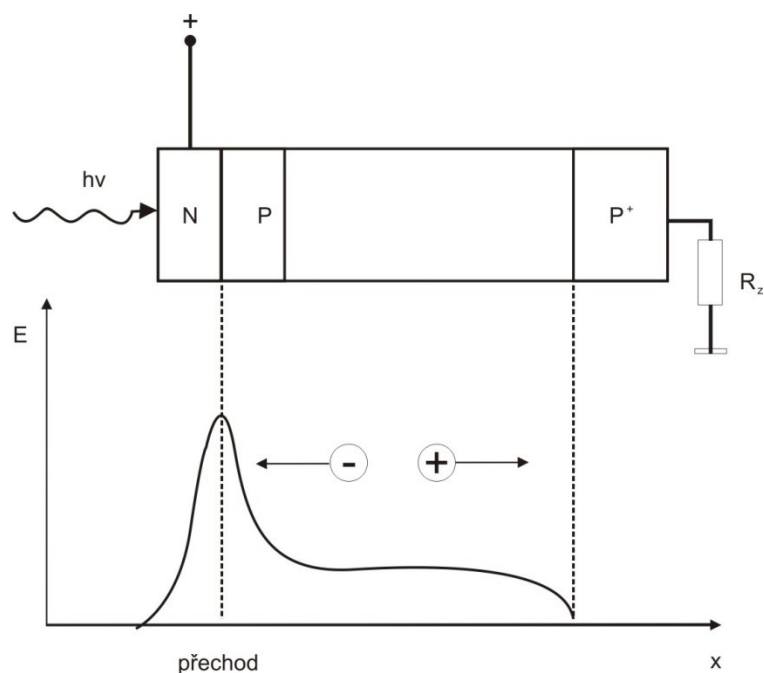
Při dopadu světla vznikají páry elektron-díra. Tyto elektrony a díry difundují pod vlivem elektrického pole v opačných směrech. Pro získání dobrého generování těchto párů je nutné, aby byla oblast i (prostřední část) co nejvíce široká a postraní oblasti musí být naopak úzké [17].



Obr. 6: Princip fotodiody PIN [17]

1.3.2. APD fotodioda

APD fotodiody jsou v telekomunikační oblasti upřednostňovány kvůli své vyšší citlivosti. U APD se využívá principu lavinového efektu. To znamená, že foton, který dopadá do aktivní oblasti, vyrazí jeden pár elektron díra. To posléze spustí takzvaný lavinový efekt, kdy jsou následně vyraženy další atd. Výroba APD fotodiod je však nákladnější a proto jsou tyto fotodiody dražší než PIN fotodiody. Nevýhodou lavinových fotodiod je také potřeba předpětí a také to, že proces multiplikace zvyšuje i úroveň šumu [17].

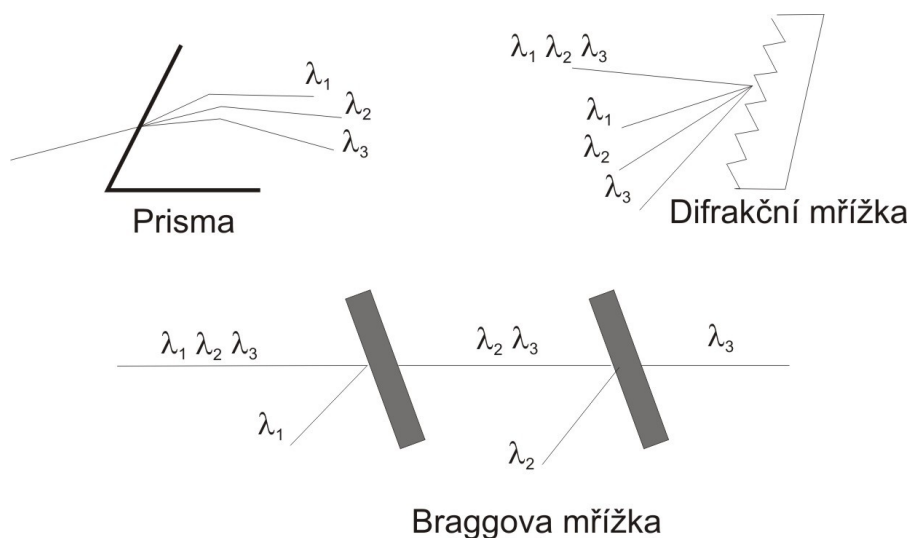


Obr. 7: Princip fungování lavinové (APD) fotodiody [17]

1.4. Vlnovodné routery AWG

Vlnovodné routery jsou často používány v optických sítích WDM. Používají se jako multiplexery, demultiplexory nebo jako NxN routery.

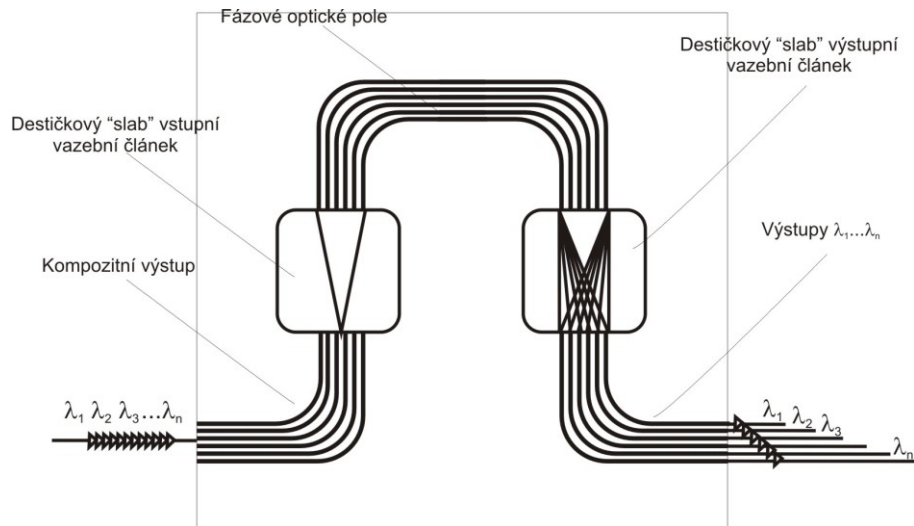
Multiplexery se využívají v topologii, jelikož nám umožňují spojit několik různých vlnových délek z více vláken do jednoho vlákna. Demultiplexery na rozdíl od multiplexerů provádějí přesný opak. NxN routery kombinují možnosti multiplexerů a demultiplexerů. Možností jak rozložit světlo je více. Například nejjednodušší možností, jak docílit rozkladu světla na jednotlivé vlnové délky, je použití krystalu. Tyto vlnové délky rozdělené krystalem jsou poté pomocí čočky zaostřeny na jednotlivá vlákna. Další možností je použití technologie, která využívá difrakci a optickou interferenci. Poslední možností je využití braggovy mřížky. Tato mřížka popořadě odděluje jednotlivé vlnové délky. Na obrázku (obr.8) níže jsou tyto tři principy graficky vyobrazeny [1][24].



Obr. 8: Metody rozkladu světla [5]

1.4.1. Multiplexer a demultiplexer AWG a jejich princip

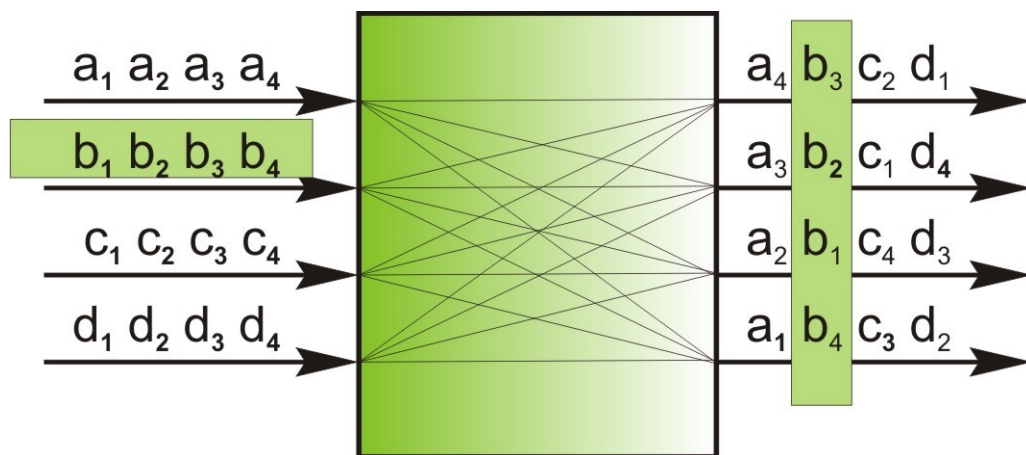
Princip multiplexerů a demultiplexerů je následující. Světelný paprsek se dostává na vstupní rozhraní multiplexeru AWG. Zde se ocitá v oblasti FPR v takzvané (Free propagation region). Tato oblast je součástí vstupního vazebního článku. V této oblasti není paprsek nijak omezen po stranách, a proto se může rozbíhat do stran. V následujícím kroku je paprsek spojen do pole vlnovodů a pak následně předáván na jejich výstup. Délka sady vlnovodů se musí zvolit tak, aby se rozdíl délky optické dráhy mezi sousedními vlnovody rovnal celočíselnému násobku centrální vlnové délky daného demultiplexeru. Pro danou konkrétní vlnovou délku, doputuje pole v jednotlivých vlnovodech k výstupnímu otvoru ve shodné fázi. Rozdělování pole na vstupním otvoru bude totožné u výstupního otvoru. Rozbíhavý paprsek, který se nachází na vstupním otvoru, je pozměněn na paprsek, který má shodnou amplitudu a fázi. Dále pak bude obraz vstupního pole, který se nachází v cílové rovině zformován přímo na střed obrazové roviny. Lineárním zvětšováním délky pole vlnovodů vzniká rozptyl AWG. Toto zapříčiní fázové změny, které vznikají změnou vlnové délky, která se mění lineárně podle výstupního otvoru. Potom bude tedy odchozí paprsek nasměrován a ohniskový bod se posune podélně podle obrazové roviny. Prostorového oddělení rozdílných vlnových délek daných kanálů dosáhneme tehdy, jestliže se poté umístí přijímač vlnovodů na konkrétní vyhovující pozici [1][24].



Obr. 9: Struktura AWG [1]

1.4.2. Směrovače AWG a jejich princip

Směrovač AWG je prvek, který je důležitý v optických sítích. Princip je následující. Směrovače obsahují N vstupů a také N výstupů. Pro každý vstupní port platí, že přenáší N různých frekvencí. Frekvence, které mohou být přenášeny vstupním kanálem jedna, jsou rozčleněny mezi výstupní kanály jedna až N a to tak, že výstupní kanál, který má číslo jedna, přenáší frekvenci N . Za to kanál N přenáší frekvenci jedna. Další frekvence jsou předávány podobným způsobem, ale cyklicky otočeny o jeden kanál. To znamená, že frekvence, které mají číslo jedna-tři budou spojeny do portu s číslem tři-jedna a frekvence s číslem čtyři bude spojena do portu čtyři. Tímto principem se docílí toho, že každý výstupní kanál dostane N rozdílných frekvencí. Tyto frekvence jsou po jedné z každého vstupního kanálu. Pro funkci opakovaného střídání rozdílných frekvencí je zapotřebí pravidelná frekvenční odezva [1][24].



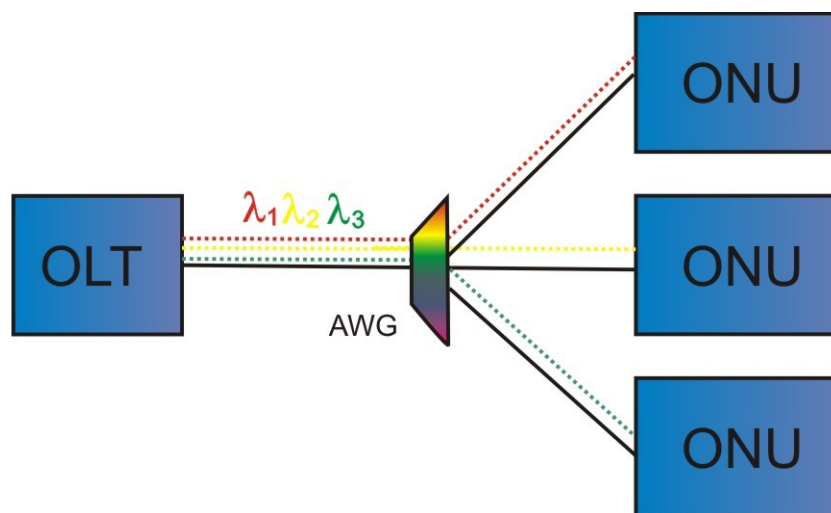
Obr. 10: Vlnovodělkový směrovač [1]

2. Optická síť WDM-PON a její modifikace

Tato další část práce pojednává o WDM-PON síti. Dále jsou uvedeny různé modifikace WDM-PON sítě. Mezi ně patří i v pozdějších částech kapitoly zmiňované Long Reach PON síť nebo SUPER-PON síť.

2.1. WDM-PON

WDM (Wavelength Division Multiplex) nebo také technologie vlnového dělení. Teoretické navržení této technologie se datuje do roku 1970. První praktický test při využití dvou vlnových délek proběhl v roce 1978 v laboratorních podmínkách. Tato technologie je využívána velice často v optických sítích. Princip WDM spočívá v tom, že po jednom optickém vlákně můžeme navzájem přenášet více kanálů. Toto je umožněno tím, že každý kanál má jinou vlnovou délku (barvu). Díky rozdílné vlnové délce jednotlivých kanálů je zabráněno jejich vzájemnému rušení. Při praktické implementaci WDM jsou použity WDM multiplexery a WDM demultiplexery. WDM multiplexer spojuje x vlnových délek do jedné vlnové cesty. Naopak demultiplexer je rozděluje zase zpátky na jednotlivé vlnové délky. Použití WDM v optických sítích umožňuje kombinovat na jednom vedení až 160 různých signálů a rozšířit kapacitu vedení z 10 Gbit/s až na teoretickou kapacitu 1.6 Tbit/s. Velká výhoda, kterou použití WDM nabízí je to, že můžeme rozšířit kapacitu stávající sítě, aniž bychom museli pokládat další optická vlákna. Většina WDM systémů využívá jednovidová optická vlákna o průměru pláště 125 μm a používá vlnové délky 1310nm 1490nm a 1550nm. Vyskytují se i WDM systémy, které využívají vícevidová optická vlákna o průměru jádra 50 a 62,5 μm a používají vlnové délky 850nm a 1300nm. Postupně s vývojem WDM bylo nutné tuto technologii standardizovat tak, aby se přesně určily vlnové délky. Tato standardizace nese označení ITU-T G.694.2 [2][3][29].



Obr. 11: WDM-PON optická síť [5]

Dále můžeme u WDM vypočítat jeho celkovou kapacitu. Celková kapacita WDM systému se vypočítá podle následujícího vzorce [15].

$$C_{WDM} = \sum_{k=1}^N V_{pk} , \quad (2.1)$$

Kde:

- C_{WDM} je celková kapacita WDM systému
- V_{pk} je přenosová rychlost k-tého kanálu
- N je celkový počet kanálů systému WDM

Pokud se přenosová rychlost V_p pro všechny kanály rovná, pak tento vztah vyjádříme rovnicí [15]

$$C_{WDM} = N \cdot V_p . \quad (2.2)$$

Také můžeme vypočítat spektrální účinnost daného WDM systému. Spektrální účinnost WDM systému se vypočítá podle následujícího vzorce [15].

$$\eta_{WDM} = \frac{C_{WDM}}{B_{WDM}} [bit \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1}] , \quad (2.3)$$

Kde η_{WDM} je celková spektrální účinnost daného WDM systému, B_{WDM} je celkové zabrané pásmo WDM systému (Vyhrazené pro WDM)

Dále B_{WDM} vyjádříme rovnicí [15]:

$$B_{WDM} = \sum_{k=1}^N \Delta B_k , \quad (2.4)$$

kde ΔB_k je šířka spektra k-tého WDM kanálu (vyhrazeno pro daný kanál bez ohledu zda kanál celé pásmo využije nebo nikoliv.).[15]

Dále se také WDM dělí podle normy ITU-T G.671 na:

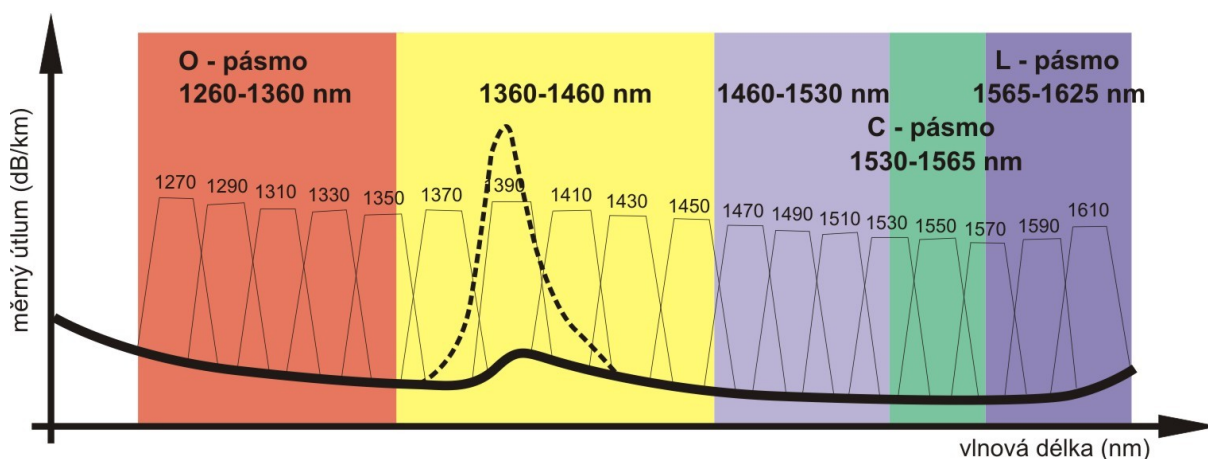
- WWDM(Wide Wavelength Division Multiplex),
- CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex),
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex).

2.1.1. WWDM

(Wide Wavelength Division Multiplex) nebo také široké dělení vlnových délek. U WWDM se při použití jednovlnových vláken nejčastěji používají čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm nebo u vícevlnových vláken v oblasti 1300 nm. Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu mají typicky rozestup 25 nm [4].

2.1.2. CWDM

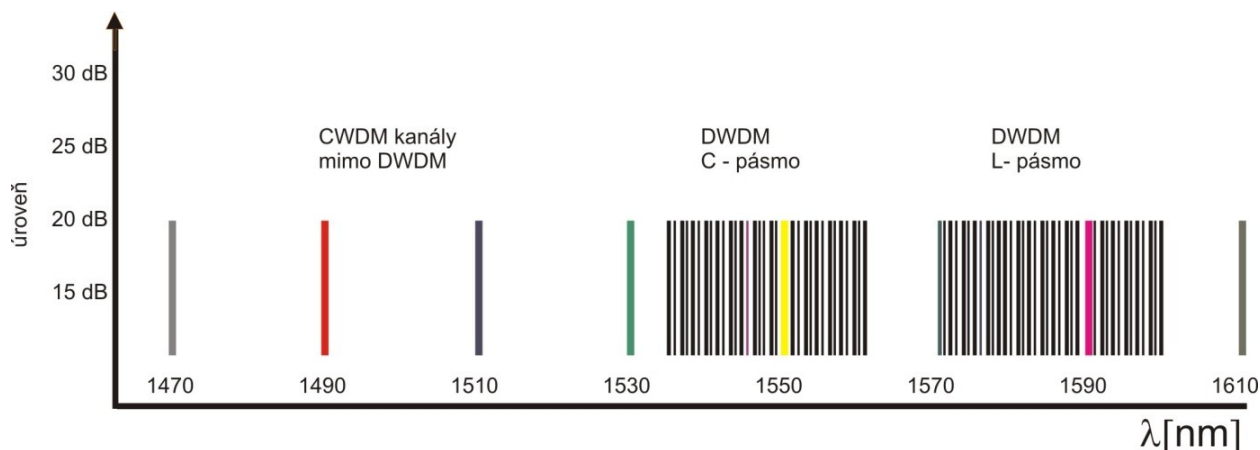
(Coarse Wavelength Division Multiplex) nebo také hrubé dělení vlnových délek. U CWDM se standardizovali jednotlivé kanály od 1270 nm až po 1610 nm a jednotlivé rozteče mezi nosnými 20 nm s tolerancí $\pm 6,5$ nm. Při takových parametrech můžeme využívat i teplotně nestabilizovaný laser. Ten je samozřejmě levnější, než lepší lasery využívané pro DWDM, např. Fabry-Perot laser dioda [2].



Obr. 12: Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2 [2]

2.1.3. DWDM

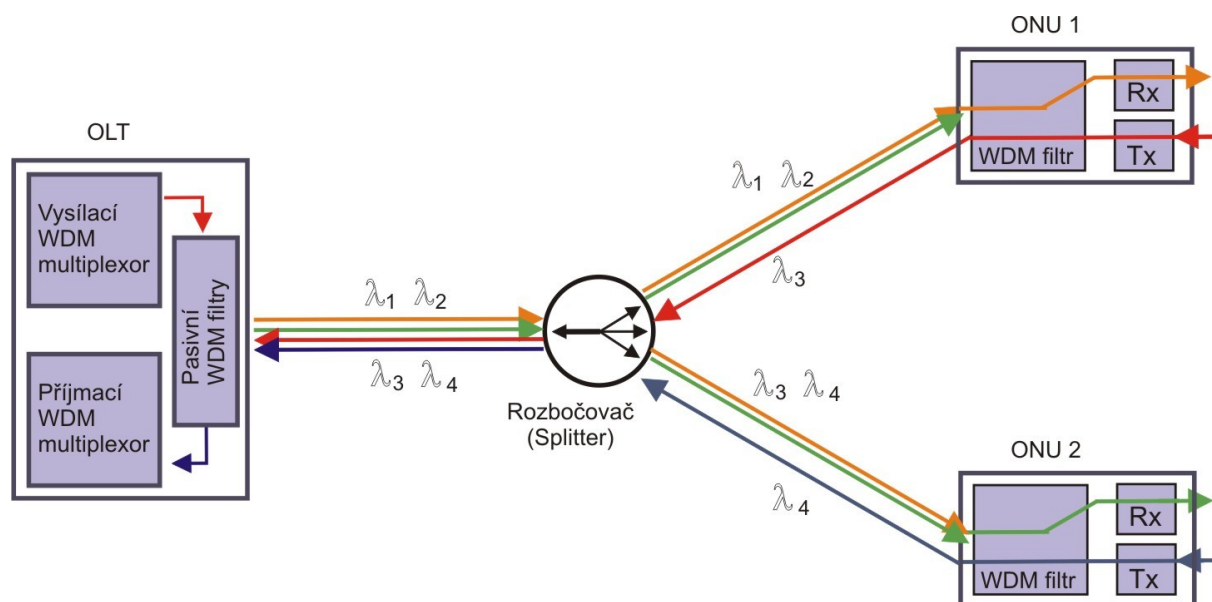
(Dense Wavelength Division Multiplex)-nebo také jemné dělení vlnových délek. Princip DWDM spočívá v tom, že mezi jednotlivými kanály se nacházejí menší rozteče než u CWDM a tudíž je v případě DWDM možno umístit do stejného pásma více vlnových délek v porovnání s CWDM. Obvykle 32,64 nebo 96 vlnových délek. U DWDM je nutno použít také kvalitnější laser např. aktivně chlazené lasery (Typ DFB Distributed Feedback Laser). Takové lasery jsou samozřejmě drahé a tím vzrůstá i cena realizace DWDM. Díky kvalitnějšímu laseru je možné docílit menších odstupů mezi kanály a tím tak lépe využít dané pásmo. Odstupy mezi vlnovými délkami se pohybují v hodnotách 5, 12, 25, 50, 100, 200GHz. Dále je uveden obrázek (obr.13) znázorňující rozdělení pásem pro DWDM [2].



Obr. 13: Znázornění pásem DWDM [31]

2.2. WDM-PON s pevně přiřazenými individuálními vlnovými délkami

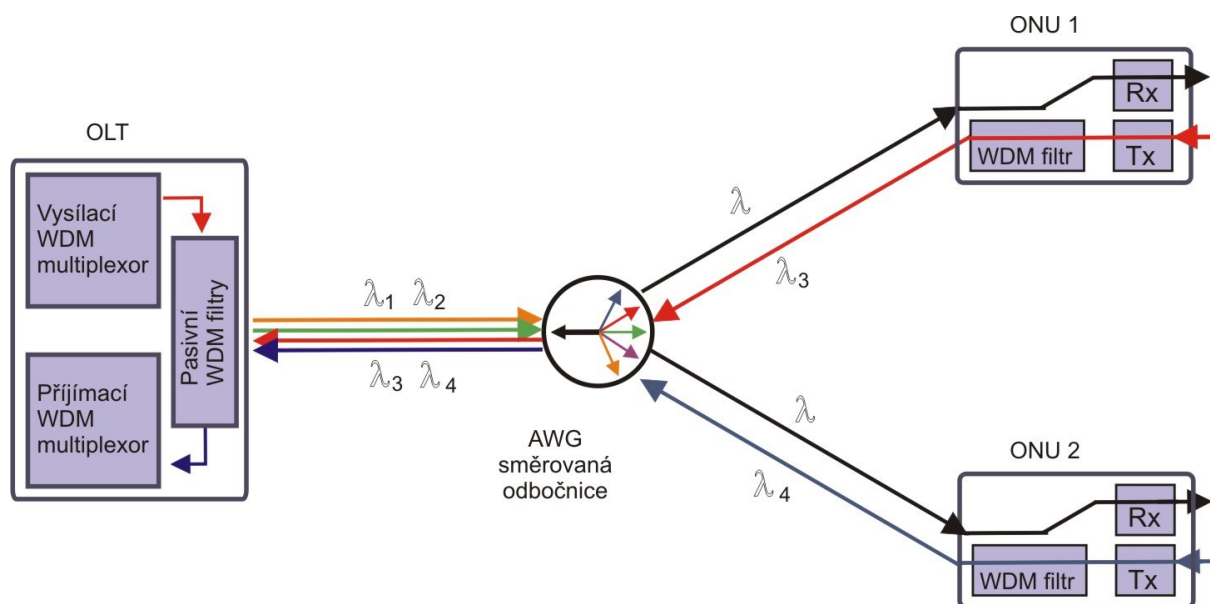
Tato varianta pracuje tak, že každé koncové jednotce je napevno přidělena vlnová délka. V praxi to znamená, že při vysílání dat v sestupném směru, jednotka OLT vysílá data na určité vlnové délce. Ty pak doputují k rozbočovači a ten je přepoše na všechny jednotky ONU. To znamená, že ke každé jednotce ONU se dostanou i data na jiných vlnových délkách, které nejsou určeny pro danou ONU. Aby každá ONU získala data, která jsou pro ni určená, řeší se tento problém použitím pasivního WDM filtru, pomocí kterého si jednotka vydělí jen svou určenou nosnou vlnovou délku. Jak už bylo uvedeno, jsou na všechny ONU šířeny i data na vlnových délkách, které daným ONU nepřísluší. Z tohoto důvodu je nutné, aby byla data patřičně zašifrována, aby nedošlo k jejich odposlechu a následnému zneužití. Co se týče vysílání dat ve vzestupném směru, má každá vysílací jednotka svou specifickou vysílací vlnovou délku na které vysílá. Jedná se tedy o architekturu typu bod-bod. U této varianty jsou možné nevýhody, jak už bylo zmíněno, například možnost odposlouchávání spojení nebo také ne zcela efektivní nakládání s kapacitami pro přenos, kdy nemůžeme aktuálně rozložit zatížení sítě. Naopak pro nasazení této verze WDM je fakt, že při použití pasivního rozbočovače na trase mezi OLT a ONU se snižují celkové náklady spojené s vybudováním takové varianty [2][29].



Obr. 14: WDM s pevně přiřazenými vlnovými délkami [2]

2.3. WDM-PON s využitím směrové odbočnice typu AWG místo pasivního rozbočovače

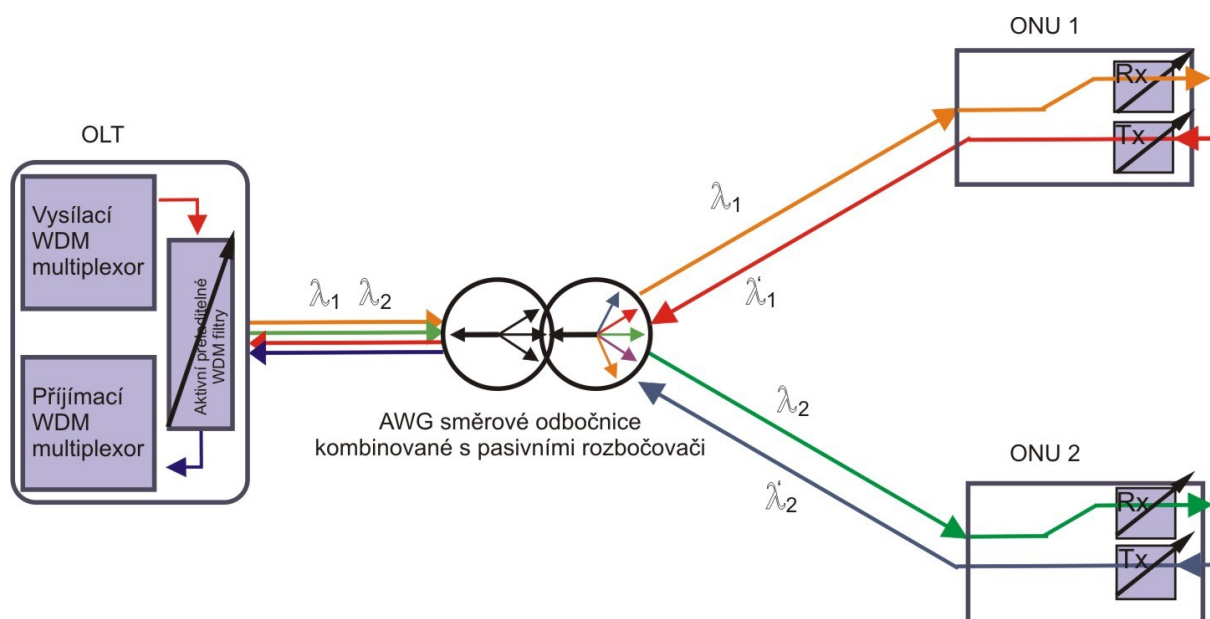
Další variantou WDM-PON je varianta, která používá směrové odbočnice na principu vydělování vlnových délek díky metodě AWG (Arrayed Waveguide Grating). Prakticky to funguje tak, že se data šíří v podobě vlnového multiplexu nosných pro každou ONU. Při použití AWG směrové odbočnice, jsou vyděleny jednotlivé vlnové délky do vytyčených směrů a k ONU jednotkám jsou přenášeny nosné v sestupném směru v jednotlivých oddělených vláknech na stejné vlnové délce λ . Ve vzestupném směru je princip shodný jako v případě použití pasivního optického rozbočovače. To znamená, že každá ONU má pro vysílání dat vyhrazenou jednu vlnovou délku. Největší přínos této varianty spočívá ve snížení celkového útlumu, díky odstranění pasivního optického rozbočovače a také díky odstranění pasivního WDM filtru ze sestupného směru (přijímaná data) [2][29].



Obr. 15: WDM s využitím směrové odbočnice typu AWG místo pasivního rozbočovače [2]

2.4. WDM-PON s kaskádním zapojením AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů

Další způsob zapojení je vlastně určitá kombinace dvou zapojení předcházejících. Zapojení v síti je takové, že za jeden pasivní rozbočovač se zapojí AWG odbočnice nebo popřípadě i více AWG odbočnic za sebou. Toto zapojení přináší řadu výhod. Například při využití více AWG odbočnic můžeme dosáhnout lepší přesnosti při vydělování vlnových délek. Při tomto zapojení jsou použity univerzální koncové jednotky a volitelné vlnové délky. Díky tomu lze přidělovat kanály podle potřeb daných ONU. Tento princip se také nazývá DWA (Dynamic Wavelength Assignment) [2].



Obr. 16: Kaskádního zapojení AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů [2]

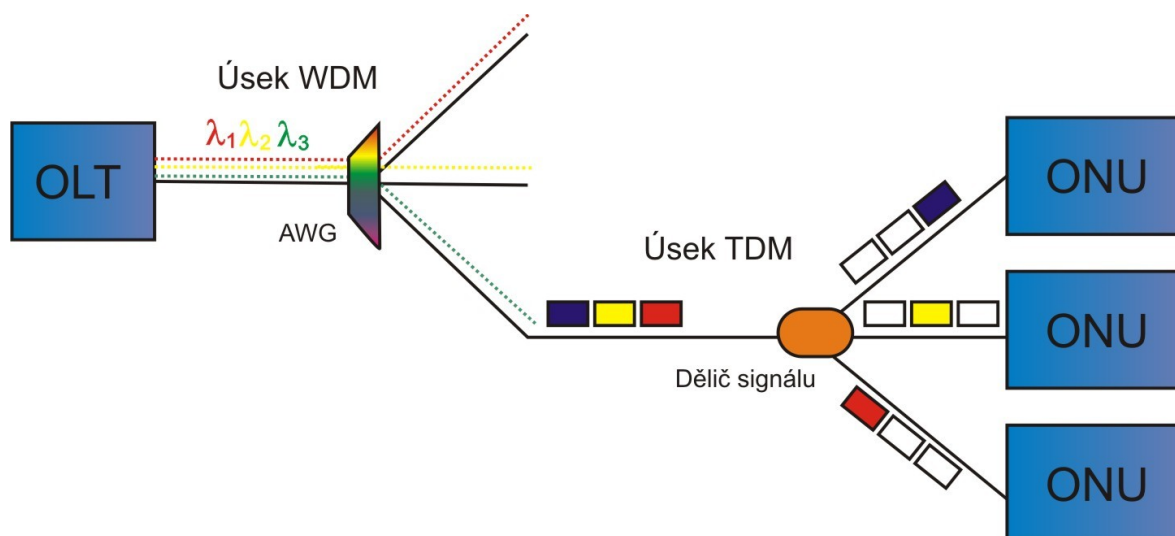
2.5. WDM-TDM PON

WDM-TDM funguje na principu využití vlnového multiplexu a zároveň na využití TDM (Time Division Multiplex) neboli časového multiplexu. Princip WDM byl podrobněji popsán výše a není třeba ho znovu rozvádět a proto se zaměříme na vysvětlení principu TDM a nakonec na vysvětlení, jak tyto dva multiplexy fungují zároveň v jedné síti.

TDM používá pro přenos dat jeden světelný zdroj (laser), který je společný pro všechny jednotky v této síti. Tato technologie funguje také na jednom přenosovém médiu. Aby nedošlo ke ztrátě dat nebo eventuálním kolizím v síti, jsou jednotlivé signály odděleny na základě přidělení tzv. časových slotů (Time slot). Tyto časové sloty mohou být v síti přidělovány buď dynamicky nebo staticky. V síti fungující na principu TDM jsou data vysílána na všechny jednotky ONU v dané síti. Aby daná jednotka ONU převzala jen data, která jí náleží, je toto zajištěno pomocí identifikátoru LLID (Logical Link ID), který se přidává do přenášeného rámce k ostatním informacím. Ohledně přenosu v sestupném směru lze přenos zajistit jednoduše, protože v síti existuje pouze jeden vysílač a více přijímačů je vyloučena kolize dat. U vzestupného směru je situace složitější. Jelikož máme v síti více jednotek ONU a každá může začít vysílat ve stejný čas, je v tomto případě kolize paketů pravděpodobná. Kolizi kvůli současnému vysílání je zabráněno použitím TDMA (Time Division multiple access) neboli časově oddělený přístup.

V praxi TDM multiplex funguje tak, že máme například signály a, b, c. Tyto signály by se v případě použití časového multiplexu posílaly za sebou takto abcabcabc atd. Samozřejmě k těmto signálům je třeba přidat ještě tzv. synchronizační časový slot (s), abychom spolehlivě určili, kde časový slot pro daný signál začíná a kde končí. Takže dostaneme vysílaný rámec vypadající takto: sabcsabcsabc atd. Hlavní výhoda u použití samotného TDM je, že máme garantovanou přenosovou kapacitu pro každou jednotku a také fakt, že celkové náklady na realizaci TDM PON sítě jsou příznivé i díky použití jednoho laseru v OLT, jak už bylo zmíněno dříve. Nasazení samotné technologie TDM má ale také nevýhody. Mezi některé z nich patří to, že nemůžeme plně využít šířky pásma, což nám zase umožňuje WDM.

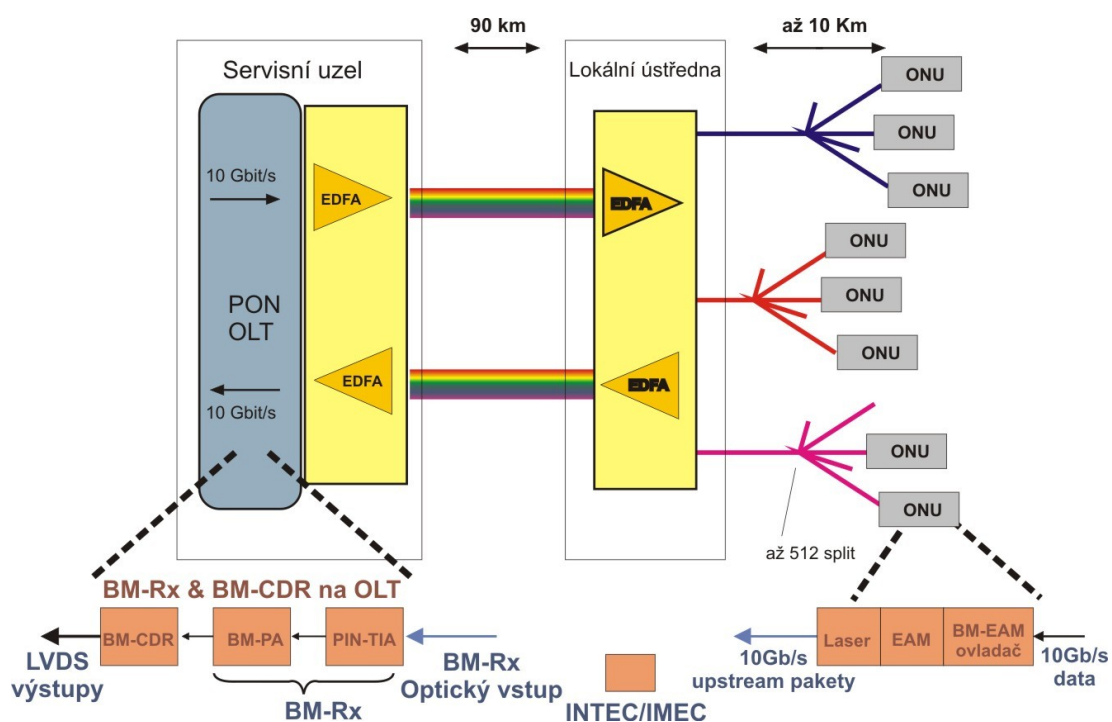
A tím se dostáváme k možnosti zkombinovat princip WDM a TDM v síti WDM-TDM. Při vhodné kombinaci těchto dvou technologií můžeme dostatečně využít možnosti optického vlákna a zároveň zajistit, aby praktická realizace nebyla tolik nákladná. Použití v síti je následující. Od jednotky OLT je použit WDM multiplex. Dále je na trase umístěn AWG demultiplexer díky kterému, se signál rozdělí na jednotlivé vlnové délky, které jsou dále přeposílány do dalších částí sítě. Tyto další síť už ale využívají princip TDM. Ukázkové zapojení WDM-TDM viz (obr. 17) [24][29].



Obr. 17: WDM-TDM optická síť [5]

2.6. Long Reach PON

Celkový koncept LR-PON sítě neboli také síť dlouhého dosahu definuje přístupové sítě, které by se rozkládaly nejméně na vzdálenost 100 km. Jejich přenosová rychlost by začínala na 2,5 Gbps. Tyto sítě by také dokázaly poskytovat připojení pro více jak 1000 uživatelů. Ovšem pro zajištění těchto parametrů sítě je nutné zajistit vývoj pokročilé přenosové techniky, tak aby tuto síť bylo možné realizovat pokud možno za rozumnou cenu.



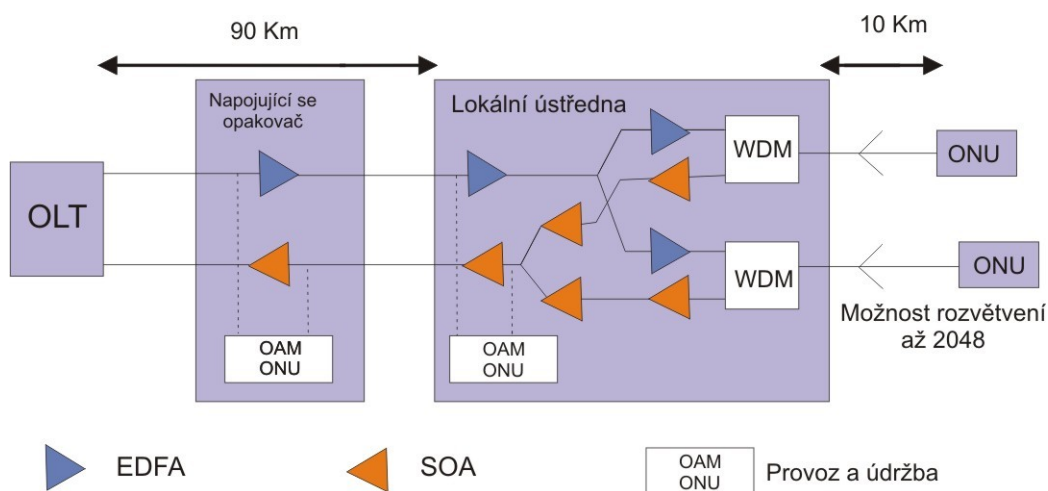
Obr. 18: LR-PON síť [30]

Cílem Long Reach PON sítě je pokrýt kompletní metropolitní síť z jediné hlavní stanice (CO-Central office). Pro překlenutí vzdálenosti 100km je téměř nutné použít v síti zesilovače pro zesílení signálu. V tomto případě jsou dobře použitelné erbiem dopované vláknové zesilovače (EDFA), které byly důkladněji popsány v předcházející kapitole [5][30].

Long Reach PON sítě jsou primárně cíleny na FTTH aplikace. Mohou být využity i pro připojení VDSL skříní nebo rádiových stanic. Jeden z cílů LR-PON sítě je snížit počet zařízení v uzlech. Dále je nutné zmenšit spotřebu energie zařízení v síti. Proto se při výzkumu sítě LR-PON zaměřuje na vývoj zařízení s nízkou spotřebou energie. V zájmu dalšího zvýšení účinnosti a zlepšení přenosové schopnosti je v LR-PON sítích použit princip vlnového multiplexu (WDM). WDM multiplex je použit pro spojení mezi CO a lokální ústřednou (Local exchange). LR-PON sítě budou do budoucna velmi používané, protože nabízejí pokrytí většího území a také celkové zjednodušení sítě a s tím spojené snížení nákladů [5][30].

2.7. Super PON

The ACTS-PLANET (Advanced Communication Technologies and Services-Photonic Local Access Network) je projekt financovaný z Evropské unie, ve kterém se prozkoumávají možnosti vylepšení ze standardu G.983, známém také jako APON, na novou vylepšenou PON síť známou pod označením Super Passive optical network nebo také jako Super PON. U Super PON sítě se vylepšují tyto aspekty, například zvětšení dosahu, zvětšení počtu připojených ONU jednotek a také možnost většího rozvětvení sítě. Základní architektura Super PON sítě je znázorněna na obrázku níže (obr. 19) [28].



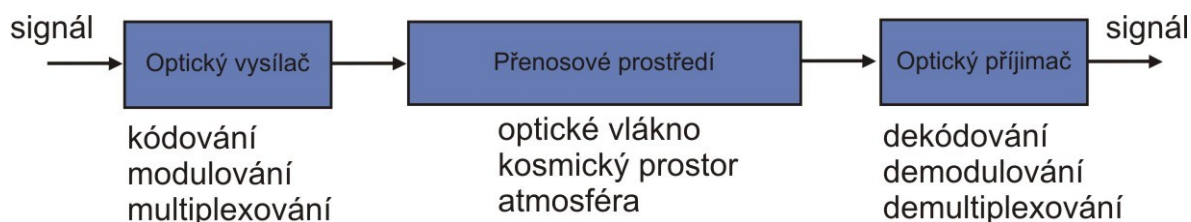
Obr. 19: Schéma fungování SUPER PON sítě [27]

Tento systém umožňuje rozvětvit síť až pro 2048 ONU jednotek. Překlenovací vzdálenost této sítě je 90 km od OLT jednotky až po lokální ústřednu(Local Exchange) a 10 km od lokální ústředny ke koncovým jednotkám ONU. Při nárůstu překlenovací vzdálenosti z 20 km na 90km a při rozvětvení sítě z 32 na 2048 ONU, vzrůstá celkový útlum. Pro kompenzaci ztráty výkonu signálu se na trase vedení používají zesilovače EDFA a zesilovače SOA. Na trase vedení v sestupném směru jsou použity EDFA zesilovače kvůli jejich vysokému výkonu. Ve vzestupném směru jsou použity SOA zesilovače, kvůli nárazovému charakteru provozu přicházejících od různých ONU. Transportní systém je založen na režimu asynchronního přenosu (ATM), které nabízí 2.5 Gbps pro downstream přenosy a 311 Mbps pro upstream přenosy. Pro komunikaci od ONU jednotky se používá metoda Time Division Multiple Access (TDMA). Tímto se také synchronizují zesilovače SOA, pro nastavení správného zesílení, pro kompenzaci různé výkonové ztráty dodaného signálu z různých ONU jednotek. Za správu a údržbu jednotek ONU je v síti zodpovědná jednotka OAM ONU. Tato jednotka přijímá a vyhodnocuje všechny informace a díky tomu je možné vypočítat přesný čas, kdy je jednotce ONU umožněn upstream. Přejít mezi dvěma následujícími upstream buňkami je nižší než 25 ns [27][28].

3. Rozbor optického systému a prvků používaných pro vytváření modulací

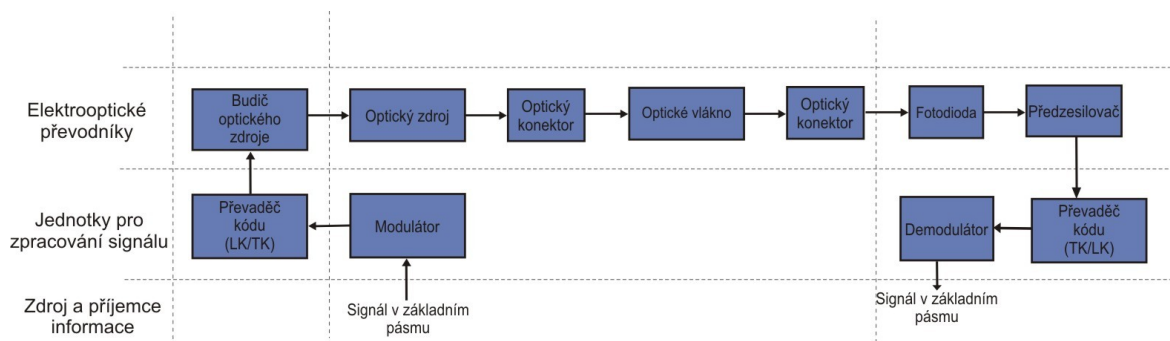
3.1. Základní popis optického systému

Optický systém slouží primárně pro přenos nebo zpracování nějaké informace. Tato informace je zpracována s využitím optické nosné vlny. Základní rozdělení optického systému je zobrazeno níže. Na obrázku (obr.20) níže můžeme vidět, že optický systém se dělí na tři hlavní části. Je to optický vysílač, přenosové prostředí a optický přijímač. V první části, což je optický vysílač, probíhá kódování signálu, jeho modulování a také multiplexování. Přenosové prostředí může být nejčastěji optické vlákno nebo atmosféra, popřípadě i kosmický prostor. V poslední třetí části, což je optický přijímač, dochází k dekódování nebo demodulování signálu a také k demultiplexování signálu [22].



Obr. 20: Základní schéma optického systému [22]

Dále je uvedeno detailnější schéma optického systému (obr. 21). Jsou na něm uvedeny skupiny, do kterých jednotlivé prvky patří.



Obr. 21: Detailní blokové schéma optického systému [22]

Optické systémy je možné dále dělit například podle druhů přenášených signálů:

- Fyzikální veličina: elektrický signál, optický signál,
- Úpravy signálu: Analogový signál, digitální signál,
- Vytíženost služby: Úzkopásmový signál, širokopásmový signál.

Optické systémy můžeme dále dělit podle způsobu modulace na:

- Systémy, kde je použita takzvaná intenzivní modulace
- Systémy, kde je použito modulování pole (koherentní systémy) [22].

Optické systémy, u kterých je použito modulování pole je možno dále dělit podle typu modulace na:

- Optické systémy s použitím amplitudové modulace (AM)
- Optické systémy s použitím frekvenční modulace (FM)
- Optické systémy s použitím fázové modulace (PM) [22].

3.2. Kódy v optických systémech

3.2.1. Linkové kódy

Linkové kódy se používají v optickém systému v části, kde dochází k vlastnímu zpracování signálu. Samotné linkové kódy musí být zvoleny podle toho, jaké je použito rozhraní daným uživatelem a jednotkou, která zpracovává signál. Mezi linkové kódy patří například NRZ nebo RZ atd. [23].

Kód NRZ je založen na dvoustavovém kódování, kde binární nula představuje nízkou úroveň signálu a binární jedna vysokou úroveň signálu. Jedna z nevýhod kódování NRZ je, že při dlouhých sekvencích nul nebo jedniček nelze podle signálu obnovit časovou synchronizaci využívanou přijímačem [11][23].

Další ze zmíněných kódů je kód RZ neboli kódování s návratem k nule. U tohoto kódování se stav signálu vrací k nule po každém impulzu. Výhoda tohoto kódování je v tom, že nepotřebuje externí zdroj hodinového signálu. Nevýhodou je jeho větší náročnost [11][23].

3.2.2. Transportní kódy

V optických systémech se používají také takzvané transportní kódy. Tyto kódy se používají před tím, než je signál přenesen přes optickou trasu. Proto, než je signál poslán optickou trasou dál, převede se linkový kód na některý z kódů transportních. Mezi tyto transportní kódy patří například Manchester kód nebo jeho obměna Diferenciální Manchester kód atd. Následně jsou popsány dva zmíněné transportní kódy [23].

Kód Manchester je založen na kódování směrem změny uprostřed bitového intervalu. Binární nula je reprezentována sestupem signálu a binární jedna zase vzestupem signálu. Při tomto kódování se na začátku bitového intervalu provádí změna, pokud je to vyžadováno [23].

Diferenciální Manchester kód je založen na kódování změnou nebo vynecháním změny na začátku intervalu. Binární nula je reprezentována změnou. Binární jedna je naopak reprezentována vynecháním změny [23].

3.3. Koherentní optické systémy a zařízení v nich používané

Pro srovnání v současnosti používané nekoherentní systémy využívají princip, ve kterém většinou užitečný signál moduluje intenzitu neboli výkon záření. U nekoherentních systémů je optický signál detekován. Tím je získán signál v základním pásmu nebo signál, který je na elektrické subnosné [19][25].

Optické koherentní systémy bychom mohli definovat jako systémy, kde užitečný signál moduluje amplitudu, fázi nebo také frekvenci koherentní optické nosné. U těchto koherentních systémů dochází v přijímači k heterodynní nebo homodynní detekci optického signálu. Toto je prováděno pomocí směšování se signálem daného generátoru. Výsledek tohoto optického směšování je, že vznikne elektrický mezifrekvenční signál, který se nachází ve frekvenčním pásmu od 0 (homodynní detekce) do cca. 10 GHz (heterodynní detekce). Výsledný signál je pak standardně zpracováván. Například synchronní nebo asynchronní demulací, různá dekódování signálu apod. Použitím koherentního přenosu optického signálu můžeme výrazně zvýšit dosah spoje. Dále také můžeme zvýšit počet optických nosných, na kterých je možno přenášet signály [19][25].

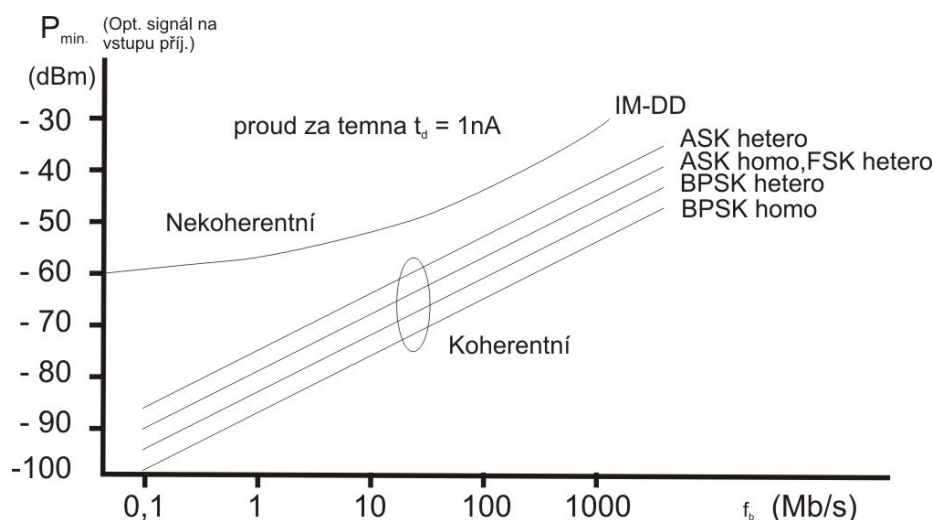
3.3.1. Optické vysílače

Optický vysílač je důležitým prvkem v optických koherentních systémech. Na optické vysílače jsou kladeny určité nároky. Jsou to hlavně tyto:

- Musí umět generovat optickou nosnou, která bude mít vysokou spektrální čistotu a úzkou spektrální čáru. Celkově bude mít tato optická nosná nízký fázový šum. To znamená, že poměr šířky čáry a šířky pásma modulačního signálu by měl být 10^{-3} až 10^{-1} . Tento poměr se samozřejmě odvíjí od použité modulační metody. Optická nosná musí mít také vysokou stabilitu středního kmitočtu. Dále musí splňovat požadavky na nízký intenzitní šum. Mezi poslední požadavky na optickou nosnou je i to, že musí být generována s dostatečným výkonem.
- Optický vysílač by měl být také přímo modulovatelný procházejícím elektrickým proudem.
- Tyto optické vysílače by měly být laditelné proudem nebo teplotou v dostatečně širokém rozsahu [25].

3.3.2. Optický přijímač

Optický přijímač je neméně důležitou a nejsložitější částí optického koherentního systému. V praxi je vyžadováno, aby byly maximálně integrovány elektronické, ale i optoelektronické a optické prvky. Největším problémem u přijímačů v koherentní optické síti je jejich stabilizace. Často se používá řešení, při kterém je nasazován takzvaný kmitočtový závěs s frekvenčním diskriminátorem, pracujícím na elektrické mezifrekvenci. Toto se prakticky řeší tak, že je lokální generátor doladěn změnou hodnoty klidového proudu, protékajícího laserovou diodou. Je také možné regulovat teplotu držáku, který jí přidržuje. Dále na obrázku (obr.22) níže je uvedeno porovnání citlivosti nekoherentních a koherentních optických přijímačů pro různé druhy modulace v závislosti na přenosové rychlosti [25].



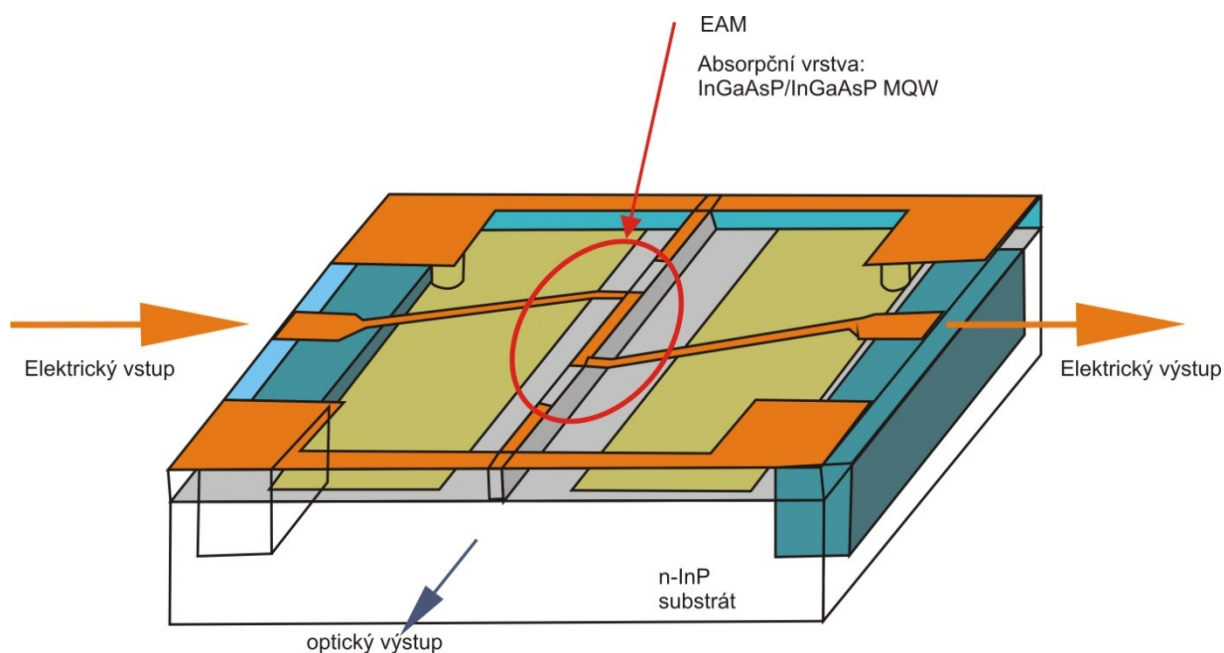
Obr. 22: Porovnání citlivosti nekoherentních a koherentních optických přijímačů. Vysvětlení zkratk modulací: IM-DD – intenzivní modulace optické nosné a přímá detekce signál v přijímači, ASK – klíčování amplitudy, FSK – klíčování frekvence, BPSK – dvoustavová fázová modulace, homo – homodynní (synchronní) detekce, hetero – s heterodynním směřováním. [25]

3.4. Modulátory

3.4.1. Elektroabsorpční modulátor EAM

EAM neboli elektroabsorpční modulátor je typ polovodičového zařízení. Toto zařízení dovoluje kontrolovat intenzitu laserového paprsku s pomocí elektrického napětí. Princip fungování modulátoru je postaven na Franz-Keldysh efektu. Tento jev funguje na principu změny absorpčního spektra způsobenou aplikací elektrického pole. Tato změna obvykle nepoškozuje buzení nosičů elektrickým polem. Elektroabsorpční modulátory jsou vyrobeny ve tvaru vlnovodu a obsahují elektrody, které slouží pro použití elektrického pole. Tyto elektrody jsou umístěny v kolmém směru na modulovaný světelný paprsek.

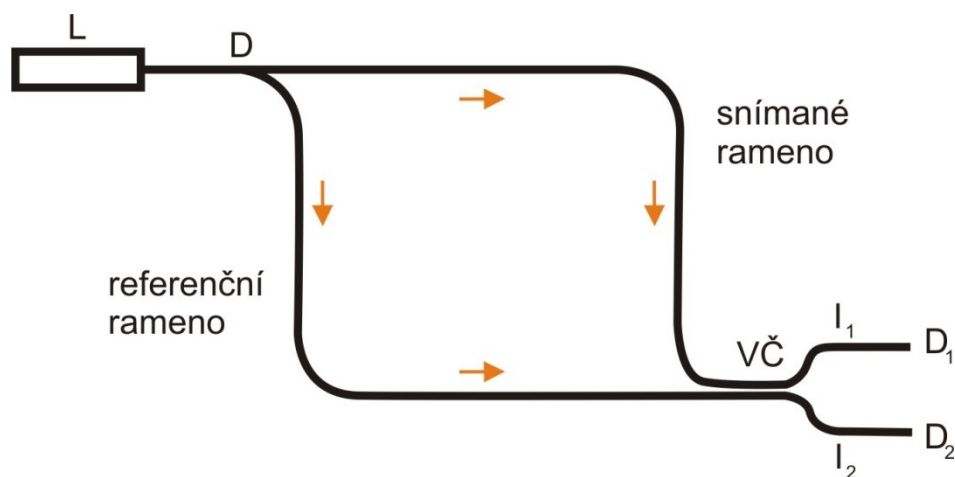
Elektroabsorpční modulátory mohou být nasazeny tam, kde se dosahuje velmi vysokých rychlostí nebo kde je šířka pásma v řádu desítek GHz. Díky tomu jsou EAM vhodné pro optické komunikace. Výhodou elektroabsorpčních modulátorů je, že mohou pracovat s mnohem menším napětím v rámci několika voltů, namísto stovek voltů jako je tomu u elektrooptických modulátorů. Dalším přínosem je možnost, že modulátory mohou obsahovat na jediném čipu vlastní zpětnovazebnou laserovou diodu [5].



Obr. 23: Elektro absorpční modulátor (EAM) [5]

3.4.2. Mach-Zehnder modulátor (MZM)

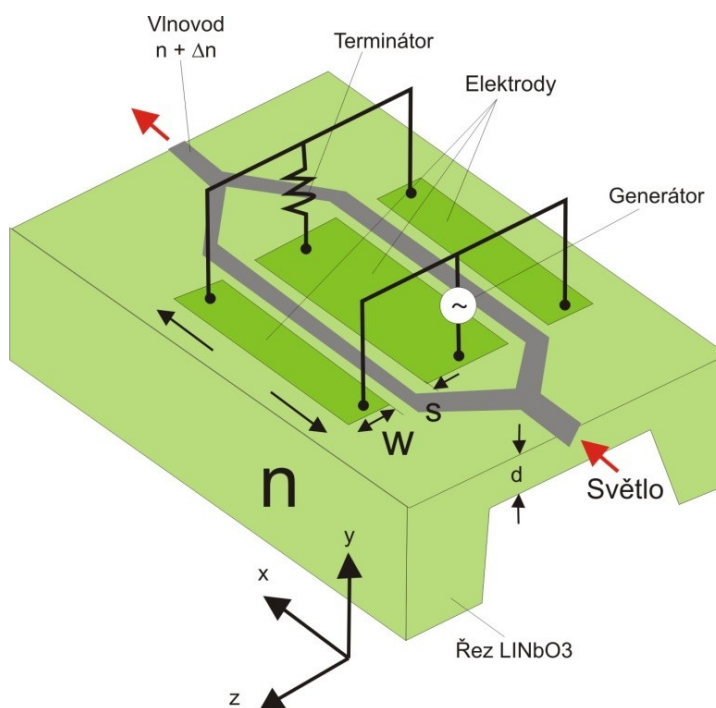
Neboli také Mach-Zehndrův interferometr. Princip MZM modulátoru (obr.24) je založen na tom, že světlo přichází z laseru L do optického děliče označeného jako D. Dělič rozdělí paprsek světla rovnoměrně do obou cest jednovíkových vláken. Tyto paprsky prochází dále ve dvou ramenech a poté jsou opět spojeny ve vazebním členu VČ. Ve vazebním členu dojde k opětovnému složení světelných vln. Toto spojování se děje podle takzvaného principu superpozice. Stav zmíněných ramen je neustále zpracováván. Ramena jsou rozdělena na rameno snímané a rameno referenční. Snímané rameno je potaženo materiálem, který je velice citlivý na sledovaný parametr. Referenční rameno je naopak chráněno od působení všech vnějších vlivů. Vlivem působení externího podnětu dochází u snímaného ramene ke změně indexu lomu a tím se změní i samotná fáze světla. Referenční rameno je však dobře odstíněno a tyto změny se u něj neprojeví [8][14][18][19].



Obr. 24: Princip Mach-Zehnderova modulátoru (MZM) [18]

Porovnáním výstupů z jednotlivých ramen dostaneme výsledný fázový posun. Je-li fázový posun mezi oběma vlnami 0° , pak je interference takzvaně konstruktivní a intenzita světla na výstupu je vysoká (on stav), pokud je fázový posun 180° , pak je interference takzvaně destruktivní a intenzita světla je nulová (off stav) [8][14][18].

Mach-Zehnderův modulátor je schopen pracovat ve vlnových délkách od 1300nm až do 1500nm. Tyto vlnové délky jsou v dnešní vysokorychlostní digitální komunikaci velice využívány. Proto se Mach-Zehnderův modulátor používá ve WDM systémech a také pro metropolitní síť [14][19].



Obr. 25: Mach-Zehnder optický modulátor (MZM) [26]

4. Metody modulace optického záření

4.1. Modulace

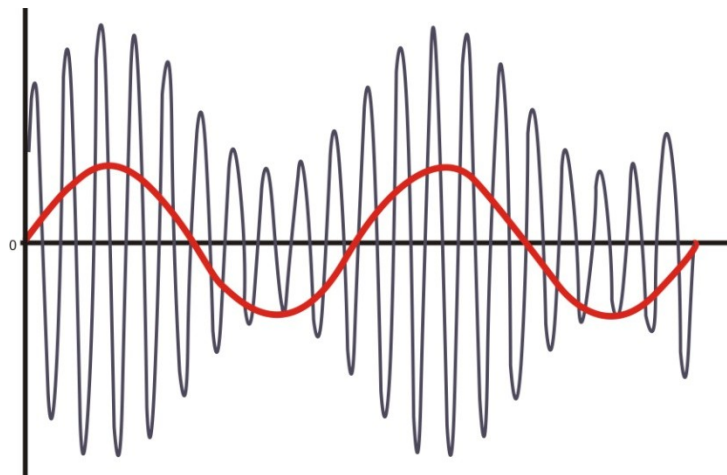
Je nelineární proces, při kterém se mění charakter vhodného nosného signálu prostřednictvím modulujícího signálu. Při modulaci jde vlastně o takzvané „vtisknutí“ informačního obsahu nosné vlně optického záření. Modulace v optických sítích se dále dělí na amplitudovou modulaci (AM), při které se mění amplituda elektrického pole záření nebo výkon úměrný modulačnímu signálu. Další typ modulace je modulace frekvenční (FM). Při této modulaci se mění frekvence záření úměrně modulačnímu signálu. Poslední typ modulace je modulace fázová nebo také Phase Modulation (PM). Níže budou tyto modulace blíže upřesněny [13][9].

4.1.1. Amplitudová modulace

Amplitudová modulace patří mezi takzvané spojité modulace. Je to nejstarší druh modulace používaný v různých experimentech od roku 1900. U této modulace je amplituda nosného signálu závislá na změně modulačního signálu. Při této modulaci nedochází ke změně frekvence a nemění se ani fáze nosné vlny. Dále jsou uvedeny typy amplitudových modulací [10].

- **AM DSB (Dual Side Band)**

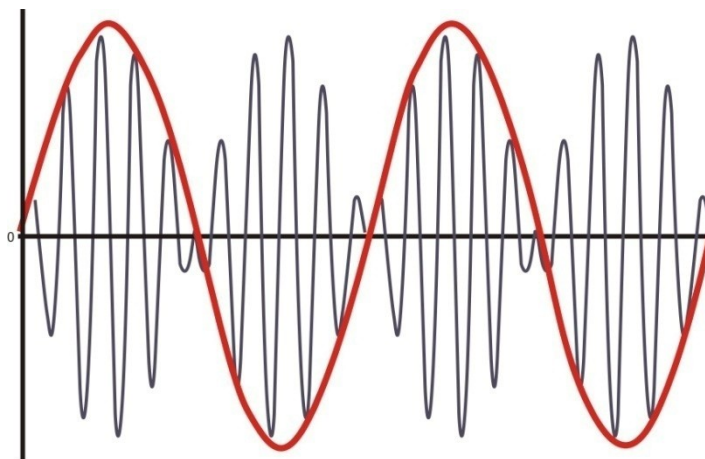
Tento typ amplitudové modulace má ve frekvenčním spektru zachovány jak nosnou vlnu tak i dvě takzvané součtové a rozdílové postranní pásma [10].



Obr. 26: Časový průběh AM DSB s plnou nosnou [10]

- **AM DSB SC (Dual Side Band Supressed Carrier)**

Tento typ amplitudové modulace obsahuje součtové a rozdílové postranní pásmo, ale nosná vlna je úplně potlačena [10].



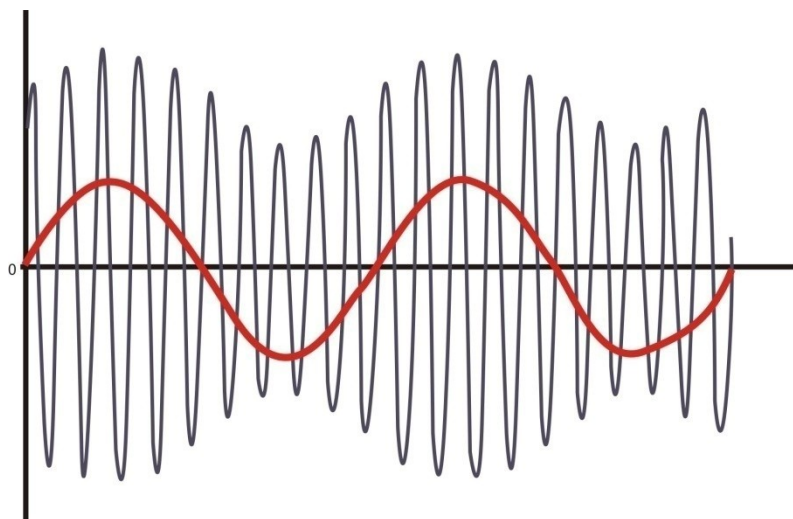
Obr. 27: Časový průběh AM DSB s potlačenou nosnou [10]

- **AM DSB RC (Dual Side Band Reduced Carrier)**

Tento typ amplitudové modulace obsahuje součtové a rozdílové postraní pásmo, ale velikost nosné vlny je zmenšena [10].

- **AM SSB (Single Side Band)**

Tento typ amplitudové modulace obsahuje jen jedno pásmo a to buď součtové nebo rozdílové postraní pásmo a nosná vlna zůstává zachována [10].



Obr. 28: Časový průběh AM SSB s plnou nosnou [10]

- **AM SSB SC (Single Side Band Supressed Carrier)**

Tento typ amplitudové modulace obsahuje jen jedno pásmo a to buď součtové nebo rozdílové. Postraní pásmo a nosná vlna jsou u tohoto typu zcela potlačeny [10].

- **AM SSB RC (Single Side Band Reduced Carrier)**

Tento typ amplitudové modulace obsahuje jen jedno pásmo a to buď součtové nebo rozdílové. Postraní pásmo a velikost nosné vlny je zmenšena [10].

Dále je uvedeno matematické vyjádření amplitudové modulace. Nosnou vlnu můžeme popsat vztahem [10]:

$$n(t) = N \sin(\Omega t), \quad (4.1)$$

kde N představuje amplitudu nosné vlny a Ω představuje její úhlový kmitočet. Jednoduchý harmonický signál nesoucí naši informaci $m(t)$, jímž chceme nosnou modulovat, popíšeme vztahem [10]:

$$m(t) = M \sin(\omega t + \phi), \quad (4.2)$$

kde ϕ je fázový posun vůči nosné vlně $n(t)$. Amplitudová modulace vznikne přidáním signálu $m(t)$ k amplitudě nosné vlny N . Dále dosadíme rovnici do vztahu pro nosnou vlnu a dostáváme vzorec [10]:

$$y(t) = (N + M \sin(\omega t + \phi)) \sin(\Omega t). \quad (4.3)$$

Tento výraz je možné upravit do tvaru [10]:

$$y(t) = N \sin(\Omega t) + M \frac{\cos((\Omega - \omega)t + \phi)}{2} + M \frac{\cos((\Omega + \omega)t + \phi)}{2} \quad (4.4)$$

Z tohoto vzorce je vidět, že modulovaný signál se skládá ze tří částí, které byly objasněny výše, jedná se tedy o nosné, součtové a rozdílové pásmo [10].

4.1.2. Frekvenční modulace

Frekvenční modulace neboli také FM funguje na principu závislosti okamžitého kmitočtu nosné vlny na změnách amplitudy modulačního signálu. Toto lze vyjádřit jako okamžitou úhlovou frekvenci $\Omega(t)$, která představuje funkci času a mění se v rytmu okamžité výchylky modulačního signálu. Data jsou tedy kódována jen změnou frekvence nosné vlny [10].

Dále je pro frekvenční modulaci uveden matematický zápis. Obecně bude mít nosná vlna následující průběh[10]:

$$u_n(t) = U_n \sin(\Omega t + \phi), \quad (4.5)$$

kde U_n je amplituda nosné vlny, Ω je úhlová frekvence nosné vlny a ϕ fáze. Při tomto příkladu frekvenční modulace je funkcí času právě úhlová frekvence Ω .

Úhlovou frekvenci můžeme také vyjádřit jako harmonickou funkci času a zápisem [10].

$$\Omega(t) = \Omega + \Delta\Omega \cos(\omega t), \quad (4.6)$$

kde $\Delta\Omega$ je frekvenční zdvih, ω je pak úhlový kmitočet modulační vlny. Potom tento výpočet dosadíme do rovnice pro výpočet nosné vlny a určíme, že fázový posun bude $\phi = 0$ dostáváme rovnici [10]

$$u_n(t) = U_n \sin((\Omega + \Delta\Omega \cos(\omega t))t) = U_n \sin(\Phi(t, \omega)). \quad (4.7)$$

Funkce $\Phi(t, \omega)$ je okamžitá fáze napětí a pro $\phi = 0$ je integrálem úhlové frekvence $\Omega(t)$ podle t . Toto vyjádříme tedy jako [10]:

$$\Phi(t, \omega) = \int \Omega(t) dt = \int (\Omega + \Delta\Omega \cos(\omega t)) dt = \Omega t + \frac{\Delta\Omega}{\omega} \sin(\omega t). \quad (4.8)$$

Veličina m_{FM} se označuje jako index kmitočtové modulace[10].

$$m_{FM} = \frac{\Delta\Omega}{\omega} = \frac{2\pi\Delta f}{2\pi f_m}, \quad (4.9)$$

kde Δf je frekvenční zdvih a f_m frekvence modulačního signálu. Poté dosadíme funkci $\Phi(t, \omega)$ zpět do rovnice [10],

$$u_n = U_n \sin(\Phi(t, \omega)) \quad (4.10)$$

a dostáváme tvar rovnice pro frekvenčně modulované vlny [10]:

$$u_n = U_n \sin(\Omega t + m_{FM} \sin(\omega t)), \quad (4.11)$$

- kde u_n je okamžitá hodnota napětí modulovaného signálu,
- U_n amplituda nosné vlny,
- Ω úhlová frekvence nosné vlny,
- m_{FM} modulační index,
- ω frekvence modulační vlny.

4.1.3. Fázová modulace

Fázová modulace nebo také Phase Modulation (PM), je typ modulace u které dochází ke změně fáze nosné vlny, kterou mění modulační signál. Fázová modulace patří spolu s modulací frekvenční k úhlovým modulacím a to proto, že modulační signál pozměňuje úhel nosné vlny.

Dále je uvedeno matematické vyjádření této modulace. Modulační signál má frekvenci ω_m a fázi ϕ_m . Můžeme ho vyjádřit rovnicí [10]:

$$m(t) = M \sin(\omega_m t + \phi_m). \quad (4.12)$$

Nosnou můžeme popsat rovnicí [10]:

$$c(t) = C \sin(\omega_c t + \phi_c). \quad (4.13)$$

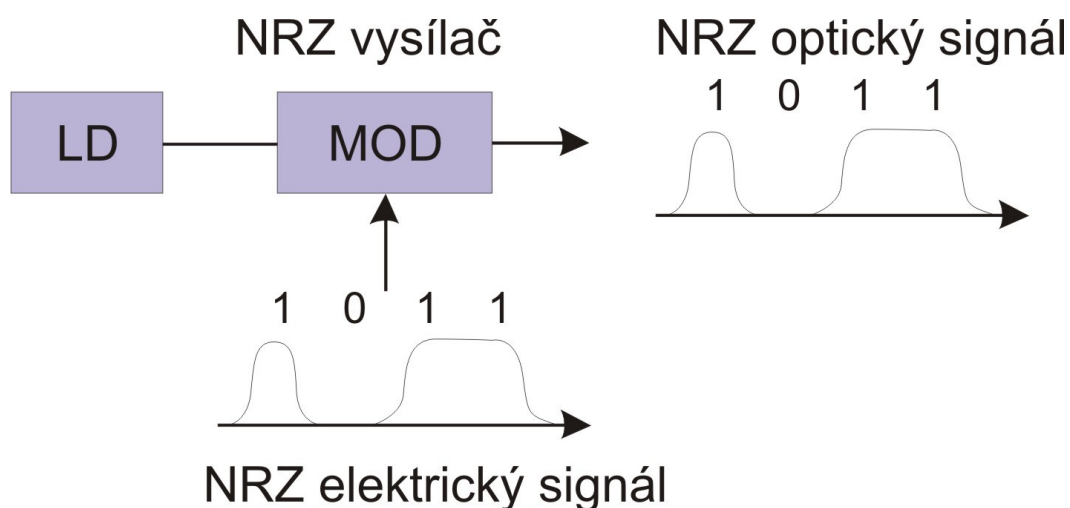
Když toto dosadíme do rovnice, můžeme modulovaný signál vyjádřit rovnicí [10]:

$$y(t) = C \sin(\omega_c t + m(t) + \phi_c) \quad (4.14)$$

5. Modulační formáty

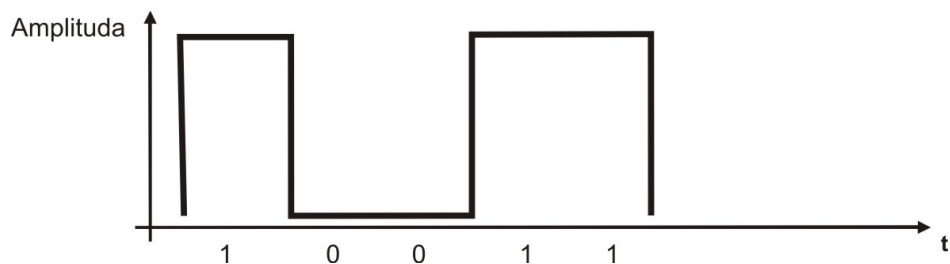
5.1. NRZ OOK modulace

Po dlouhou dobu byl modulační formát Non-return to Zero On Off Keying neboli také NRZ OOK dominantním modulačním formátem v optických komunikačních systémech. Existuje několik důvodů pro použití NRZ v počátcích opto-vláknových komunikačních systémů. Prvním důvodem je, že NRZ vyžaduje relativně malou elektrickou šířku pásma pro vysílače a přijímače (při porovnání s RZ). Dalším důvodem je také to, že tato modulace není tak citlivá na šum fáze laseru (ve srovnání s PSK modulacemi). Posledním důvodem pro použití modulace NRZ je nejjednodušší konfigurace a nastavení vysílače. V posledních letech optické komunikační systémy dosahují stále větších přenosových rychlostí nebo se stále více používá DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex). Také se stále zvětšuje dosah optických sítí při použití optických zesilovačů. V tomto případě není NRZ modulace pro tyto vysoko kapacitní optické systémy nejlepší volbou [11].

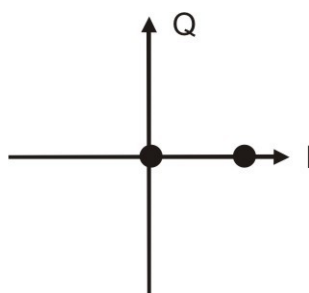


Obr. 29: Blokové schéma vysílače pro NRZ OOK [11]

Dále je na obrázku (obr. 29) uvedeno blokové schéma vysílače NRZ, kde můžeme vidět, že elektrický signál je modulován pomocí externího modulátoru intenzity. Pro tuto modulaci může být použit buď Mach-Zehnder nebo elektroabsorpční modulátor, který přemění OOK elektrický signál s určitou přenosovou rychlostí na OOK optický signál stejné rychlosti přenosu dat. Pro opětovné dekódování signálu se na straně přijímače u NRZ používají jednoduché fotodiody, které převádějí optický signál zpět na signál elektrický. Tento převod s použitím jednoduchých fotodiód se nazývá direct detect (DD) neboli přímá detekce. Tento způsob přímé detekce se může použít i pro jiné modulační formáty, například pro všechny druhy RZ modulací (RZ 33%, RZ 50 %, CSRZ, CRZ, DB atd.). Dále u NRZ modulace platí, že má nejkompaktnější spektrum v porovnání s jinými formáty modulací. Toto ale neznamená, že NRZ má lepší odolnost proti zbytkové chromatické disperzi nebo lepší toleranci XPM a FWM v přeplněném DWDM systému. Na následujícím obrázku (obr.30) je znázorněn průběh amplitudy v čase a také konstelační diagram pro tuto modulaci (obr.31) [11].



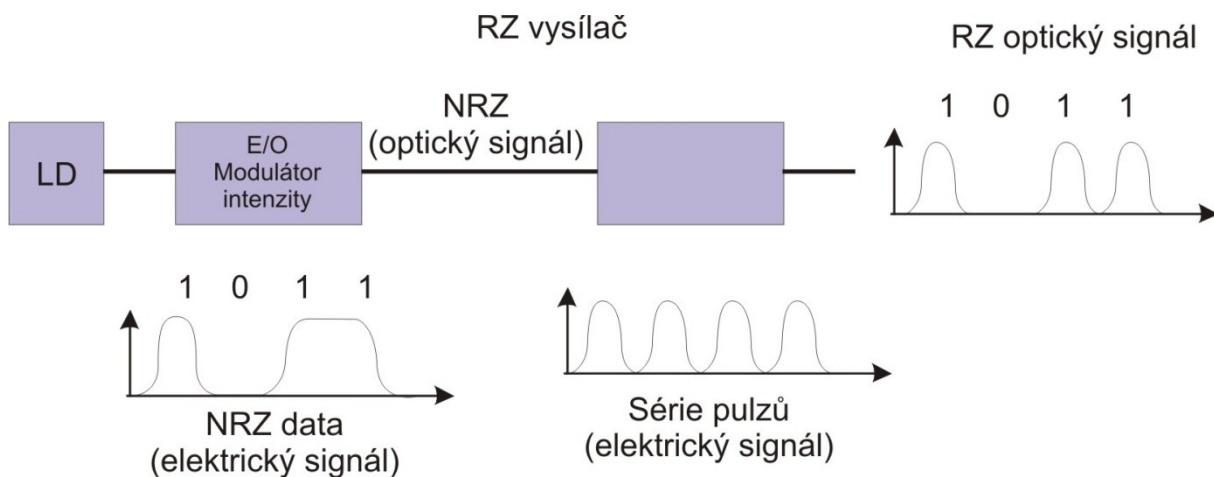
Obr. 30: Znáznornění amplitudy v čase pro modulaci NRZ-OOK [33]



Obr. 31: Znáznornění konstelačního diagramu pro modulaci NRZ-OOK [33]

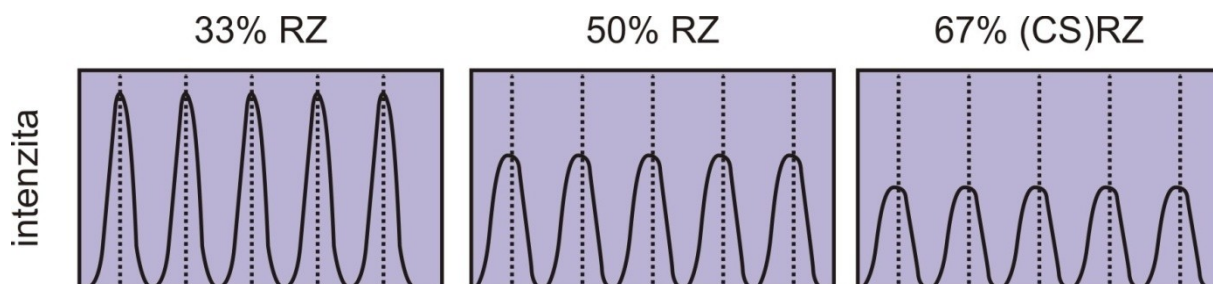
5.2. RZ OOK modulace

RZ OOK nebo také Return to Zero On Off Keying. RZ znamená návrat k nule, takže šířka optického signálu je menší než bitová perioda. U tohoto kódování je bitová nula reprezentována záporným napětím a bitová jednička je reprezentována kladným napětím. Při tomto způsobu kódování jsou požadovány větší nároky na přenosovou kapacitu. V případě RZ kódování je nutné, aby po každé změně stavu pulsu následoval návrat do takzvané neutrální hodnoty. Při těchto návratech po každém pulsu k neutrální hodnotě dochází k synchronizaci hodin příjemce a odesílatele a tak není nutné používat externí zdroj hodinového signálu. Na obrázku (obr.32) je blokové schéma typického vysílače RZ [11][12].



Obr. 32: Blokové schéma RZ vysílače [11]

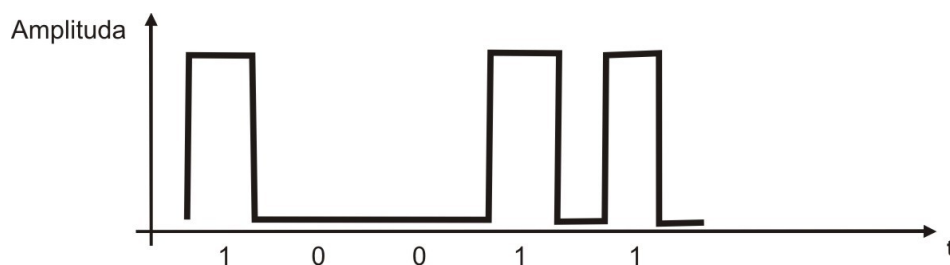
Na obrázku (obr.32) lze vidět, že prvně je modulátorem generován NRZ optický signál. Tento signál je pak dalším modulátorem upraven do výsledné podoby pro RZ kódování tak, že je namodulován pomocí synchronizovaných impulsů, které mají stejnou rychlost přenosu dat jako elektrický signál. RZ modulace pracuje s větší šířkou optického spektra. Díky tomu, že pracuje s větší šířkou optického spektra je tato modulace více vhodná pro nelineární režim při použití vysokých rychlostí například nad 10 Gbit/s. U této modulace lze pro samotný přenos využít různé šířky pulzů. Můžeme volit mezi 33%, 50% nebo 67% atd. Tyto šířky pulzů jsou zobrazeny na obrázku (obr.33) níže.



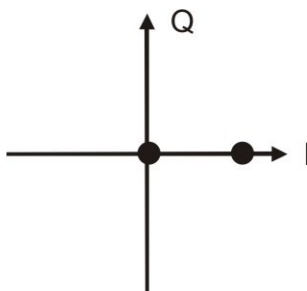
Obr. 33: Obrázek zobrazující optickou intenzitu pro různé pulzní tvarovače [12]

Tato modulace se při rychlostech do 10 Gbit/s realizuje většinou elektronicky a při rychlostech přenosu větších než 40 Gbit/s se tato modulace řeší opticky. Při převodu z NRZ na RZ se u těchto vyšších rychlostí používá pro řešení tohoto převodu pulzní tvarovač [11] [13].

Dále je uveden obrázek (obr.34), který znázorňuje amplitudu a čas při této modulaci. Na vedlejším diagramu je uveden konstelační diagram (obr.35).



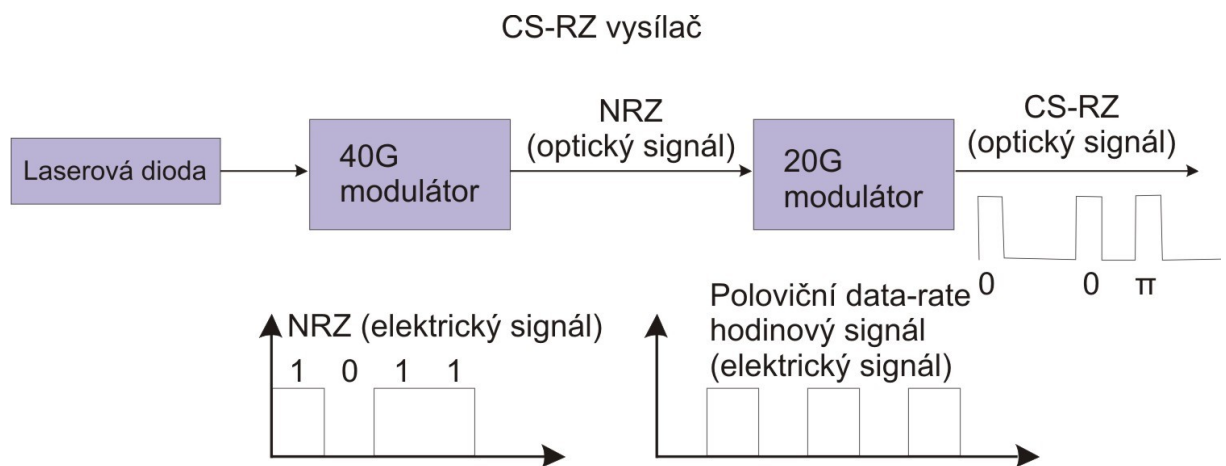
Obr. 34: Znázornění amplitudy v čase pro modulaci RZ-OOK [33]



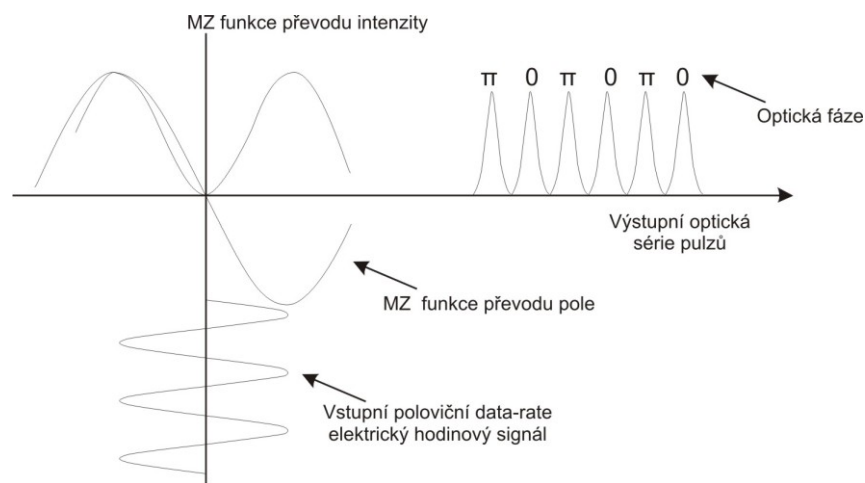
Obr. 35: Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci RZ-OOK [33]

5.3. CSRZ modulace

CSRZ modulace nebo také celým názvem Carrie Supressed Return-to-Zero. U této modulace se mění fáze optické nosné pro každý bitový interval. Toto je realizováno bez ohledu na logickou hodnotu, jak pro logickou hodnotu jedna, tak i pro logickou hodnotu nula. Kvůli tomu, že je u skoro $\frac{1}{2}$ bitů kladná fáze a u zbývajících bitů záporná fáze, jsou od sebe odečteny. Díky tomu se potom nevyskytuje ve spektru signálu velká výkonová složka nosné. Tato složka není ve výsledném signálu potřeba, protože nenese žádnou informaci. Poté je možné zvýšit výkon do části spektra, kde je nesena pro nás užitečná informace. Praktická provedení CSRZ modulace je realizováno pomocí Match-Zehnderova modulátoru (MZM). Celkově má tato modulace větší odolnost proti nelinearitám při vysokých rychlostech například nad 40Gbit/s. CSRZ modulace také nabízí dobrou možnost filtrování, aniž by ztrácela na kvalitě. Při optické filtraci lze namodulovat signál s částečně potlačeným postraním pásmem. Tato modulace se pak nazývá VSB-CSRZ. Níže na obrázku (obr.36) je uvedeno blokové schéma vysílače CS-RZ [11][12][13].

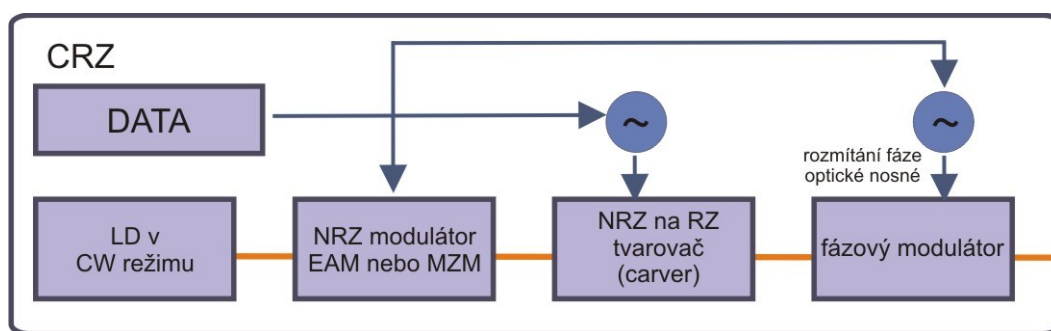


Dále také uvádím níže na obrázku (obr.37) znázornění generování CS-RZ signálu.



5.4. CRZ modulace

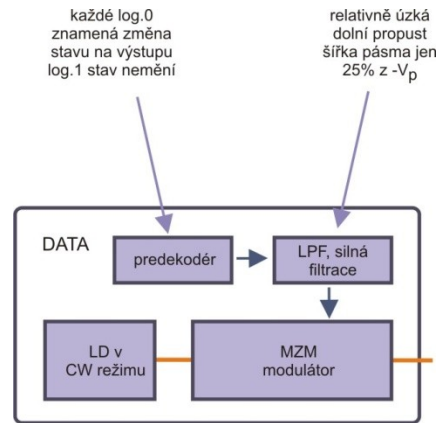
CRZ neboli také celým názvem Chirped Return-to-Zero modulace. Tato modulace spadá do podtřídy RZ modulací. Odlišnost modulace CRZ je v tom, že při vysílání RZ pulsu se v čase lehce mění fáze optické nosné. Tato odlišnost se jinak také nazývá v anglickém originále Chirping. Tato modulace má modulační amplitudu fáze přibližně jeden radián na puls. Výhoda této modulace je, že odolává nelineárním jevům lépe než například modulace RZ nebo NRZ modulace. Další výhodou je, že CRZ může být konkrétně naladěna na určitou velikost zbytkové disperze. Nevýhodou je, že kvůli větší šířce pásma, kterou modulace zabírá má horší spektrální účinnost. Pro samotnou realizaci CRZ se používá buď jeden frekvenční modulátor nebo je možné CRZ realizovat pomocí takzvaného dual drive MZM. Tento typ se dnes používá často u dálkových podmořských tras [13].



Obr. 38: Schéma pro CRZ modulaci [13]

5.5. DB modulace

DB celým názvem duobinární modulace. Tato modulace patří do takzvaných modulací s pamětí. Ta se vyznačuje tím, že dokáže při zachování stejné modulační rychlosti získat signál, který je odolnější proti chromatické disperzi (CD). Tato odolnost spočívá u duobinární modulace v tom, že sousedící logické hodnoty jedna mezi kterými je symbol logické nuly, mají vzájemně obrácenou fázi. To ve skutečnosti znamená, že při překrytí hran se takzvané příspěvky od sebe odečtou, což se například u modulace OOK neděje, protože se u ní příspěvky naopak sčítají a tím dochází k ISI. Co se týká odolnosti proti nelineárním jevům, jsou na tom jak modulace OOK, tak modulace DB víceméně stejně. Toto ovšem platí jen pro slabší nelineární jevy v případě, kdy by tyto jevy byly silnějšího rázu, modulace DB ztrácí své výhody. Při vyšších rychlostech například 40 Gbit/s je vhodnější upřednostnit DB modulaci před OOK modulacemi. Ovšem kdybychom tuto modulaci porovnávali se složitějšími vícecestavovými modulacemi, jako například DPSK nebo QPSK, potom bychom zjistili, že vícecestavové modulace jsou na tom lépe než duobinární modulace [12][13].



Obr. 39: Schéma pro duobinární modulaci [13]

5.6. BPSK modulace

Modulace BPSK neboli také Binary Phase Shift Keying patří mezi modulace fázové. U této modulace datový binární signál ovlivňuje fázi nosné vlny, ale amplituda zůstává stále stejná. Modulace BPSK je někdy také označována jako 2PSK. Její fáze může nabývat dvou stavů např. 0° a 180° . Modulaci můžeme vyjádřit podle následujících vzorců [19][34].

Jak už bylo napsáno tato modulace je dvoustavová, proto má tato rovnice dvě fáze. 0 a π . V konkrétní formě jsou binární data často vyjadřovány jako následující signály:

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad (5.1)$$

pro binární 0.

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad (5.2)$$

pro binární 1.

Kde f_c je frekvence nosné vlny. Signál je pak reprezentován základní rovnicí [34].

$$\phi(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad (5.3)$$

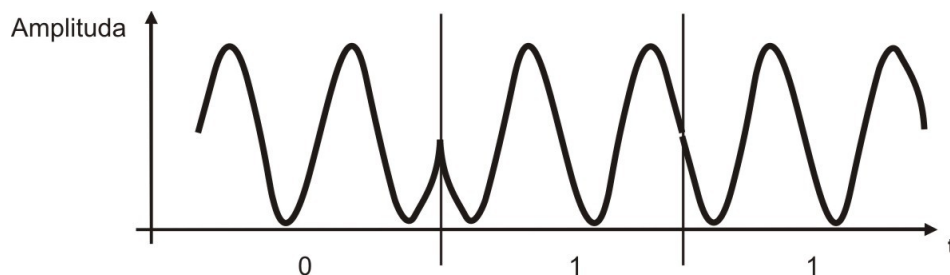
kde je binární 1 reprezentována jako [34],

$$\sqrt{E_b} \phi(t) \quad (5.4)$$

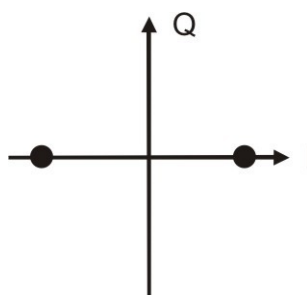
a binární 0 je reprezentována [34],

$$-\sqrt{E_b} \phi(t). \quad (5.5)$$

Dále je uvedeno znázornění amplitudy v čase (obr.40) a konstelační diagram pro modulaci BPSK (obr.41).



Obr. 40: Znázornění amplitudy v čase pro modulaci BPSK [33]



Obr. 41: Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci BPSK [33]

5.7. QPSK modulace

Modulace QPSK neboli celým názvem Quadrature Phase Shift Keying je nejpoužívanější modulací ve skupině vícecestavových modulací, založených na změně fáze nebo známé pod zkratkou PSK modulace. Toto je dáno tím, že tato modulace poskytuje dobrý poměr mezi spektrální a výkonovou účinností. QPSK modulace má nosnou vlnu, která má stále stejnou amplitudu a nabývá čtyři fázové stavy. Pro příklad lze uvést hodnoty 45° , 135° , 225° a 315° . Dále je uvedeno vyjádření QPSK modulace pomocí rovnic [19][34].

Jedná se o modulaci, při které může fáze nosné nabývat některé ze čtyř hodnot (odtud také plyne její název). Tyto hodnoty jsou vyjádřeny jako $\frac{\pi}{4}$, $\frac{3\pi}{4}$, $\frac{5\pi}{4}$, $\frac{7\pi}{4}$ [34].

Signál QPSK je určen tímto vztahem při pravoúhlém modulačním signálu v časové oblasti [34].

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t + (2i-1)\frac{\pi}{4}) \quad (5.6)$$

Kde $i = 1, 2, 3, 4$ a E je energie na symbol, T je symbolová perioda.

QPSK signály lze vyjádřit pomocí dvou vzájemně ortogonálních básových signálů [34],

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T, \quad (5.7)$$

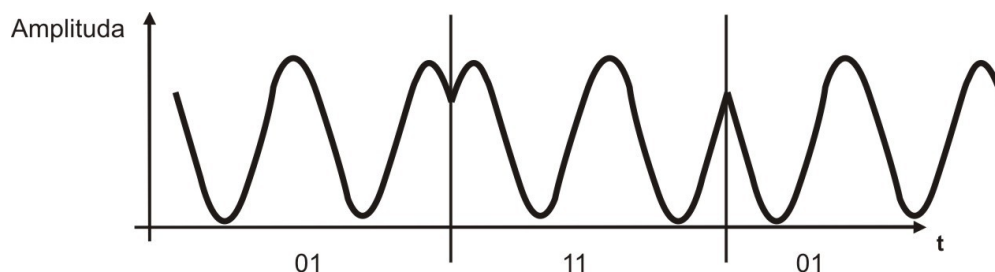
a

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T. \quad (5.8)$$

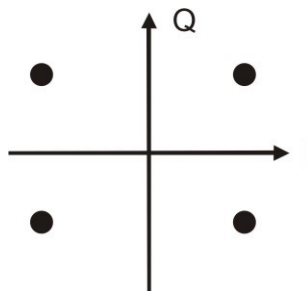
Vektorové vyjádření pak je vyjádřeno jako [34]:

$$s_i = \left[\sqrt{E} \cos\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right), -\sqrt{E} \sin\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right) \right]. \quad (5.9)$$

Dále je uvedeno znázornění amplitudy v čase (obr.42) a konstelační diagram pro modulaci QPSK (obr.43).



Obr. 42: Znázornění amplitudy v čase pro modulaci QPSK [33]

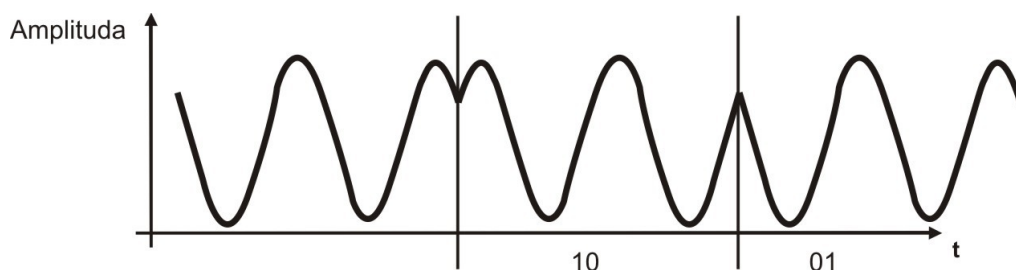


Obr. 43: Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci QPSK [33]

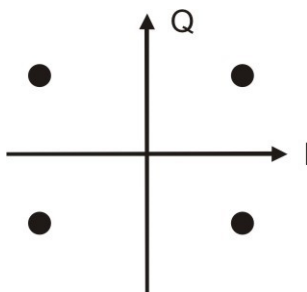
5.8. DQPSK modulace

DQPSK modulace neboli také Differential Quaternary Phase-Shift Keying. Tato modulace je čtyř levelová verze DPSK. DQPSK modulace vysílá dva bity pro každý symbol v bitových kombinacích 00,01,11,10. Tato modulace má výhodu oproti standardní DPSK modulaci v tom, že má užší optické spektrum a tak je méně náchylná vůči disperzi (chromatické i polarizační). Použití DQPSK modulace umožňuje nasazení silnějších optických filtrování a umožňuje i menší vzájemný odstup kanálů [19].

Dále je uvedeno znázornění amplitudy v čase (obr.44) a konstelační diagram pro modulaci DQPSK (obr.45).



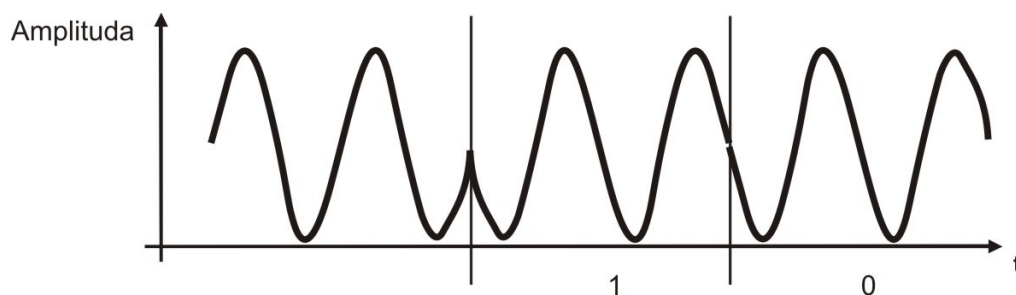
Obr. 44: Znázornění amplitudy v čase pro modulaci DQPSK [33]



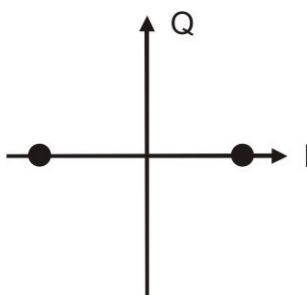
Obr. 45: Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci DQPSK [33]

5.9. DPSK modulace

Modulace DPSK neboli také Differential phase-shift keying patří do skupiny modulací fázových. Tato modulace nebyla v počátcích optické komunikace nasazována z důvodů nestability polovodičových laserových zdrojů. Dnes se však řadí k jednomu z nejpoužívanějších formátů. Při DPSK modulaci nejsou data nesena přímo v hodnotě bitu modulačního signálu, ale jsou nesena ve změně této hodnoty oproti předchozímu stavu. Pro DPSK modulaci se většinou využívá Mach-Zehndrův modulátor. Na obrázku (obr.46) níže je znázorněna amplituda v čase a také je znázorněn konstelační diagram pro tuto modulaci (obr.47) [19].



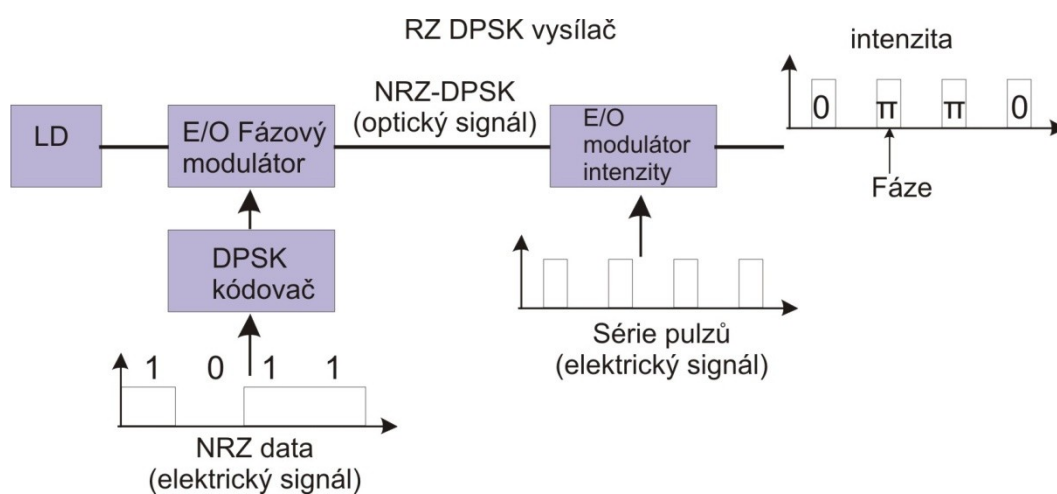
Obr. 46: Znázornění amplitudy v čase pro modulaci DPSK [33]



Obr. 47: Znáznornění konstelačního diagramu pro modulaci DPSK [33]

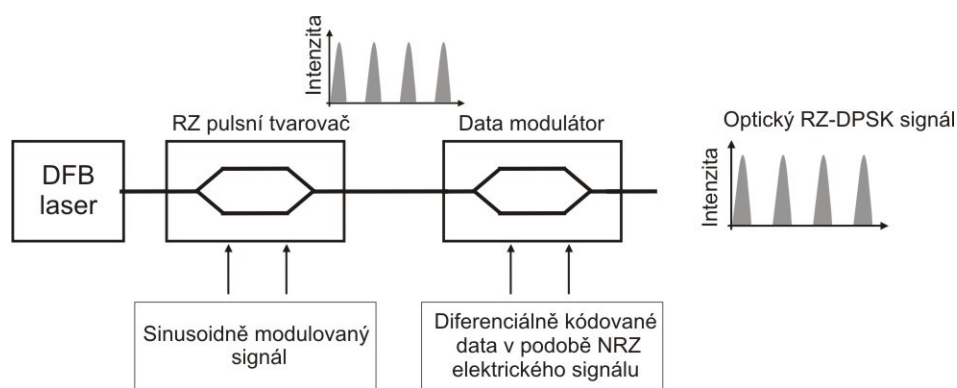
5.10. RZ-DPSK modulace

Modulace RZ-DPSK poskytuje jisté zlepšení a odolnost proti nelineárním zkreslením oproti modulaci NRZ-DPSK. Díky tomu je tato modulace vhodná k použití v optických sítích, které se rozkládají na velkých vzdálenostech. Podobně jako modulace NRZ-DPSK jsou i u modulace RZ-DPSK binární data zakódována buď jako nulový nebo π fázový posun mezi sousedními bity. Šířka optických pulsů je užší, než bitový slot a proto se signál vrátí k nule při každém novém bitovém slotu. Za účelem generování RZ-DPSK modulace je použit ještě jeden modulátor intenzity, než při NRZ modulaci. Níže je uvedeno blokové schéma vysílače RZ-DPSK (obr.48) [11][19].

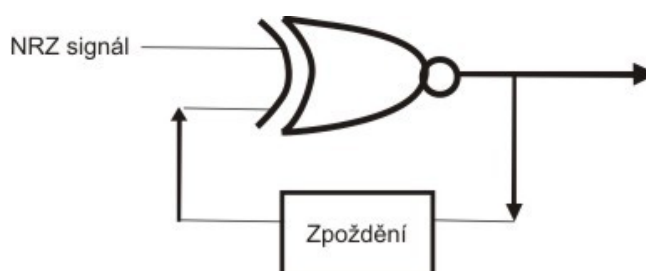


Obr. 48: Obecné blokové schéma vysílače RZ-DPSK [11]

Na obrázku (obr.49) níže je graficky znázorněno detailnější schéma vysílače RZ-DPSK. Dále je graficky znázorněn detail RZ-DPSK prekodéru (obr.50).



Obr. 49: Detailnější znázornění tvorby RZ-DPSK modulace [19]

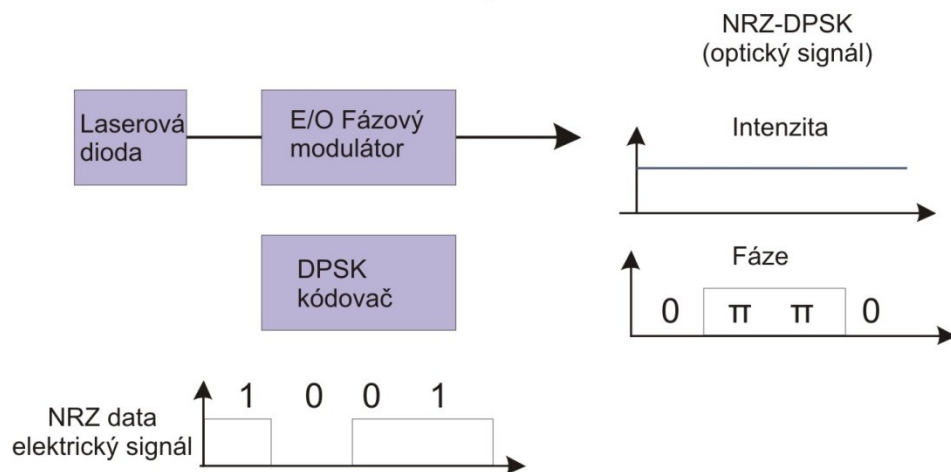


Obr. 50: Zobrazení DPSK prekodéru [19]

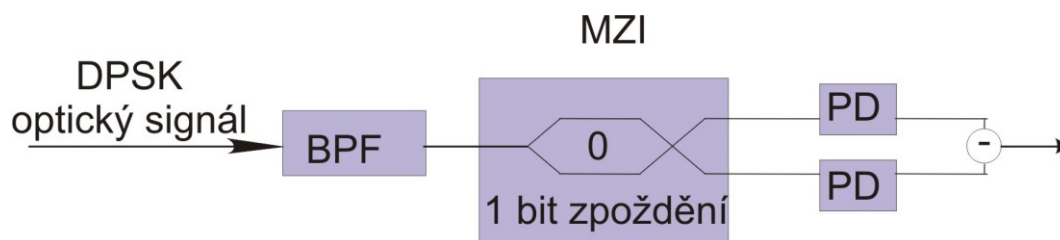
5.11. NRZ-DPSK modulace

Při modulaci NRZ-DPSK je nejprve generován signál NRZ. Ten je pak zakódován DPSK kódem. V DPSK kodéru je NRZ datový signál konvertován NOR bránou a následně kombinován s jedno bitovým zpožděním XOR brány. Tento zakódovaný elektrický signál je použit pro elektrooptický fázový modulátor, který generuje DPSK optický signál. Digitální jedna je reprezentována π fázovou změnou mezi po sobě jdoucími datovými bity v optické nosné. Pro digitální nulu nenastává žádná změna fáze po sobě jdoucími datovými bity na optické nosné. Důležitou vlastností modulace NRZ-DPSK je, že síla optického signálu je vždy konstantní. Při nasazení této modulace v rozlehlých optických sítích, kde jsou použity ve větší míře optické zesilovače, může být limitujícím faktorem pro NRZ-DPSK modulaci nelineární fázový šum. Na obrázku (obr.51) a (obr.52) níže je znázorněno blokové schéma vysílače a přijímače NRZ-DPSK [11][19].

NRZ-DPSK vysílač



Obr. 51: Schéma NRZ-DPSK vysílače [11]



Obr. 52: Schéma NRZ-DPSK přijímače [11]

6. Jevy negativně ovlivňující přenos signálu v optických sítích

Tato část práce pojednává o některých jevech, které negativně ovlivňují přenos signálu v optických vláknech. Tyto jevy jsou většinou popsány pouze okrajově, protože se tato práce na ně primárně nezaměřuje.

6.1. Útlum optických vláken

Optická vlákna, jsou velmi vhodná pro přenos dat na velké vzdálenosti a dochází u nich i přesto k útlumu. Útlum může být způsoben různými vlivy. Například absorpcí nebo rozptylem v jádře a plášti optického vlákna. Útlum je také vidově závislý. Jednotkou útlumu je dB. Hodnota útlumu slouží jako měřítko ztrát optické energie ve vláknech. Útlum ve vláknu se vypočítá pomocí následujícího vzorce [20][21].

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} [dB] \quad (6.1)$$

6.1.1. Ztráty absorpcí

Princip jevu ztráty absorpcí spočívá v tom, že se elektromagnetická energie přeměňuje na energii tepelnou. U optických vláken, která jsou používána pro telekomunikační účely, se nárůst tepla, ke kterému dochází vlivem provozu velice obtížně měří. Obtížnost měření je dána velmi malým vzrůstem tepla. Absorpci můžeme dále rozdělit na absorpci vlastní a absorpci nevlastní [17][21].

6.1.2. Ztráta vyzařováním

Tyto ztráty vznikají vlivem lomu šířících se paprsků na rozhraní dvou dielektrických prostředí. Tato prostředí mají odlišné vlastnosti. Při tomto jevu je část energie vyzařena z jádra ven [17][21].

6.1.3. Ztráta rozptylem

Ztráty rozptylem jsou způsobovány většinou už při samotné výrobě optických vláken. Rozptylové ztráty vznikají nejčastěji na nečistotách v optických vláknech. Mohou vznikat také na fluktuacích krystalické mřížky [17][21].

6.1.4. Ohybové ztráty

Ohybové ztráty vznikají při porušení podmínky totálního odrazu. Porušení této podmínky nastává, když se změní úhel šíření ve vláknech. Paprsek světla poté dopadá pod větším úhlem a tímto vlivem se láme do pláště. Ztráty vlivem ohybu je možno redukovat navržením trasy s velkými poloměry zakřivení nebo popřípadě zkrácením vlnové délky [21].

6.2. Ztráty způsobené disperzí

U ztrát způsobených disperzí nedochází ke ztrátám jako takovým. Při disperzních jevech nedochází k úbytkům energie, ale navázaná energie je do vlákna rozprostřena v čase. Disperzní jevy můžeme dále rozdělit na disperzi, módovou, chromatickou a polarizačně vidovou.

6.2.1. Módová disperze

Tato disperze vzniká, protože jednotlivé módy se šíří v rozdílných optických trasách a jejich časy šíření ve vlákne jsou rozdílné. Odstranění módové disperze, dosáhneme například použitím jednobodových vláken. Nevýhodou jsou některá omezení, která z toho plynou a také fakt, že jednobodová vlákna jsou finančně dražší. Díky lepším disperzním parametrům je možné pro částečné odstranění použít i gradientní vlákna [20][21].

6.2.2. Chromatická disperze

Tuto disperzi způsobuje použitý materiál při výrobě optického vlákna a také použitý zdroj záření, konkrétně jeho spektrální šířka. Chromatická disperze je menší při aplikování laserové diody jako zdroje záření, než při aplikování LED zdroje záření. Chromatická disperze je dána vztahem [17][20][21].

$$\Delta t_{cd} = \frac{D(\lambda)}{L \cdot \Delta \lambda} \quad (6.2)$$

6.2.3. Polarizačně vidová disperze

Jedná se o zkreslení jednotlivých optických impulsů. Tato disperze se objevuje kvůli rozdílnostem v délce trasy jednotlivých polarizačních rovin vidu, které procházejí deformovaným vláknem. Polarizačně vidová disperze je pro vzdálenosti do 10 km vyjádřena následujícím vzorcem [17].

$$PMD = \frac{\Delta \tau}{l} [ps \cdot km^{-1}], \quad (6.3)$$

kde l je délka optické trasy. $\Delta \tau$ představuje zpoždění signálu. Pro vzdálenosti přibližně větší než 10 km je nutné vzorec upravit do dané podoby, která je uvedena níže [17][20][21].

$$PMD = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{l}} [ps \cdot km^{-1}] \quad (6.4)$$

6.3. Nelineární jevy

6.3.1. Materiálový rozptyl

Při tomto nelineárním jevu dochází k rozptylu světelné vlny. Světelná vlna je rozptýlena vlivem srážek s tepelně, popřípadě akusticky kmitajícími atomy vlákna. Materiálový rozptyl v důsledku toho způsobuje, že výstupní výkon je odlišný od vstupního výkonu. Také rozptýlená vlna se liší od vlny dopadající ve vlnové délce [17][20].

6.3.2. Ramanův rozptyl

Neboli také Stimulated Raman Scattering(SRS). Při Ramanově rozptylu dochází k interakci mezi fotony a částicemi světlovodného materiálu. Záření rozptýlené má odlišnou vlnovou délku oproti záření dopadajícímu. Pro potlačení tohoto jevu je vhodné například zvětšit průměr jádra vlákna [17][20].

6.3.3. Brillouinův rozptyl

V anglickém originále Stimulated Brillouin Scattering (SBS). Při Brillouinovu rozptylu se monochromatické světlo dostává do interakce s akustickými vlnami ve světlovodu. Při interakci nastává frekvenční posun ve zpětném směru. Brillouinův rozptyl lze potlačit například vhodným rozšířením spektra signálu [17][20].

6.3.4. Čtyřvlnné směšování

Neboli Four Wave Mixing(FWM). Při tomto jevu se dva a více signálů při různých vlnových délkách dostávají do společné interakce. Při interakci vznikají signály o nových vlnových délkách. S tímto jevem je nutné počítat hlavně u DWDM technologie, kde se vyskytují přenosové kanály velmi blízko u sebe [17][20][21].

6.3.5. Vlastní fázová modulace

Nebo také Self Phase Modulation(SPM). Vzniká, když působí optický impuls sám na sebe. Při růstu nebo poklesu výkonu na hranách impulsu se mění fáze šíření. Vlivem toho dochází k tvarovému zkreslení a také rozšíření spektra impulsu. Jev vlastní fázové modulace působí například ve WDM systémech, kde vlivem tohoto jevu vzniká vzájemná interference mezi přenosovými kanály [17][20][21].

6.3.6. Křížová fázová modulace

V angličtině známé pod názvem Cross Phase Modulation(XPM). V přenosovém médiu k tomuto jevu dochází vlivem interakce světelného paprsku s jiným světelným paprskem. Při tom je změněna optická fáze světelného paprsku. Křížová fázová modulace vzrůstá tehdy, jestli je zvyšován optický vstupní výkon nebo je zvyšována přenosová rychlost. U WDM systému může být tento jev snížen pomocí vhodného zvolení bitové rychlosti navzájem sousedících kanálů [17][20][21].

7. Rozbor návrhu WDM-PON sítě v programu Optiwave

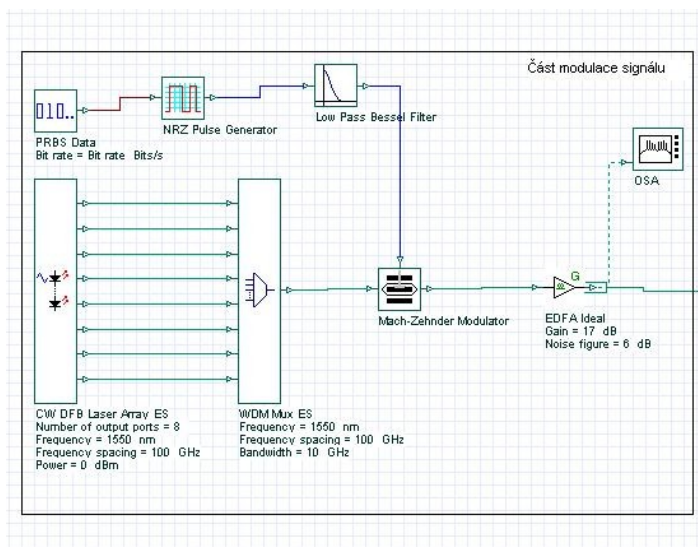
V této části je vysvětlen praktický návrh WDM-PON sítě v programu Optiwave. Také je zde detailněji ukázáno nastavení některých prvků v této síti. Dále jsou rozebrány jednotlivé části WDM-PON sítě podrobněji. Budou zde blíže popsány prvky, které se budou opakovat pro většinu modulací. Prvky, které jsou specifické pro konkrétní modulace, budou popsány v dalších kapitolách dále u samotných modulací.

7.1. OLT jednotka

OLT jednotka představuje část sítě na straně internetového poskytovatele. Její účel spočívá v tom, že zajišťuje multiplexování a demultiplexování signálu, který je přenášen přes optickou trasu.

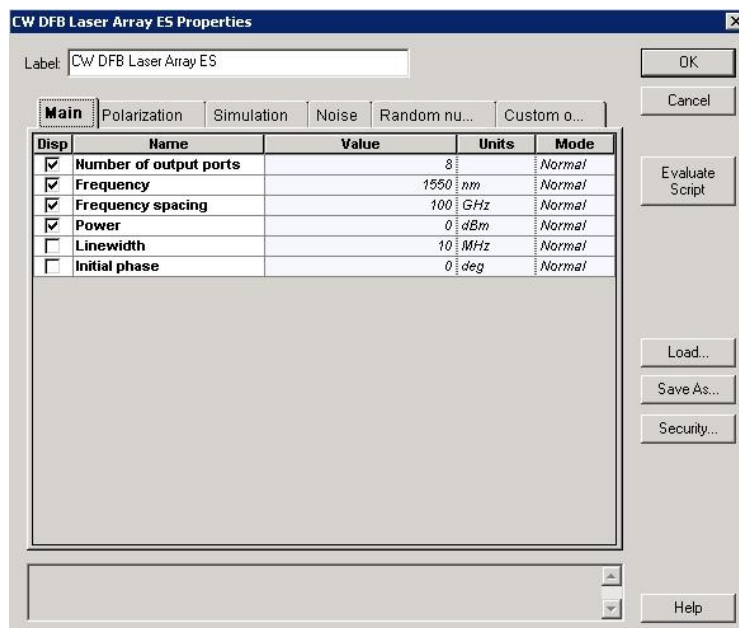
7.1.1. Modulace signálu

V této části WDM-PON sítě dochází k vytvoření signálu a jeho následné modulaci. Dále pro lepší představu uvádím obrázek (obr.53), znázorňující část pro modulaci signálu na straně OLT jednotky.



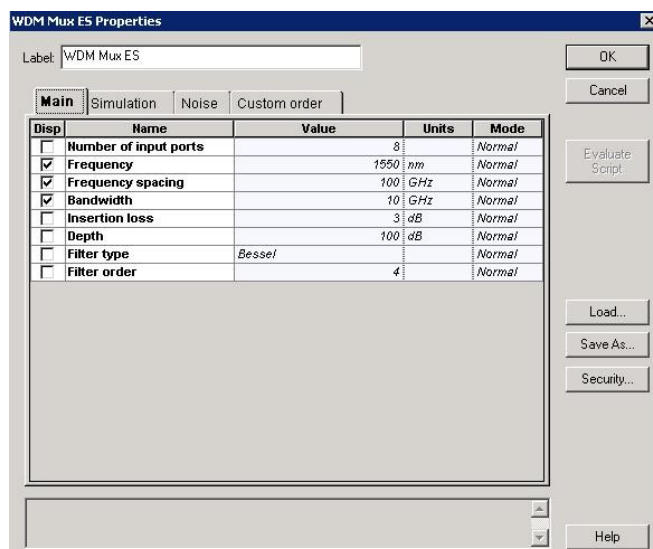
Obr. 53: Znázornění části pro modulaci signálu

Pro generování provozu v síti je použita komponenta Pseudo-Random Bit Sequence Generátor neboli generátor pseudo náhodné sekvence bitů, který simuluje datový provoz v síti. Dále se v této části nachází zdroj světla v podobě laserového pole CW laserů. Toto laserové pole bylo použito k tomu, aby seskupilo osm jednotlivých CW laserů dohromady.



Obr. 54: Nastavení CW pole laserů

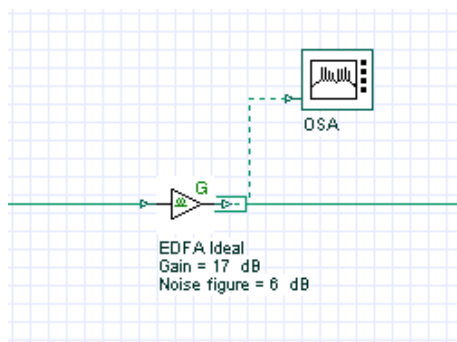
Počet výstupních portů u tohoto pole je nastaven na 8. Frekvence je nastavena na 1550 nm a frekvenční mezery jsou nastaveny na 100 GHz, což odpovídá rozestupu 0,8 nm mezi jednotlivými kanály. Tento rozestup odpovídá rozestupům definovaným pro DWDM. Dalším parametrem je výkon a ten je nastaven na hodnotu 0. Posledními nastavenými parametry jsou šířka pásma, která je nastavena na 10 MHz a počáteční fáze, která je nastavena na hodnotu 0. Dále se v této části nachází WDM multiplexer, který nám spojí jednotlivé kanály do jednoho optického vlákna. Jeho nastavení je uvedeno na obrázku (obr.55) níže.



Obr. 55: Nastavení WDM-Multiplexeru v části pro modulaci signálu (OLT jednotka)

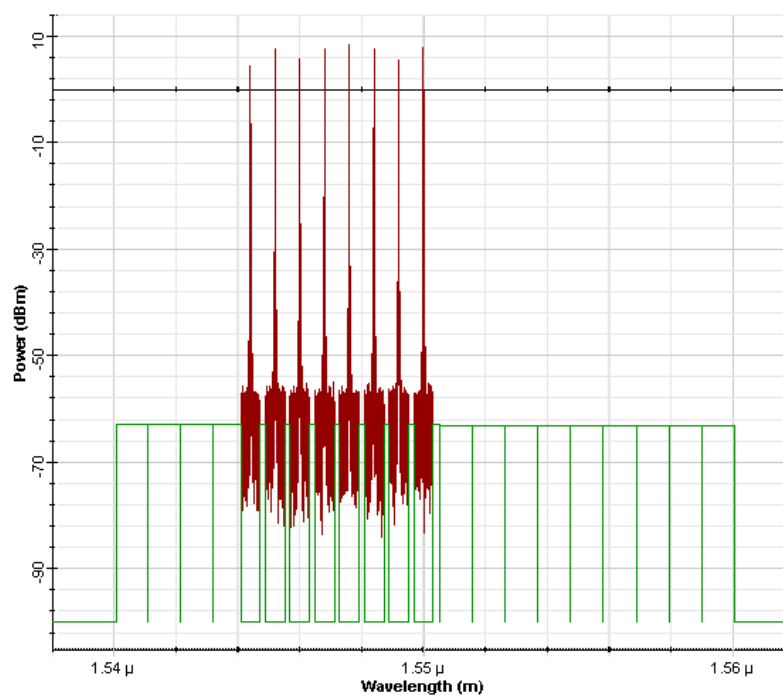
U WDM multiplexeru jsou některé parametry stejné jako u pole laserů a proto tyto parametry již nebudou znovu popisovány. Mezi jiné parametry patří šířka pásma, která je nastavena na 10 GHz. Další parametr je vložný útlum, ten je nastaven na hodnotu 3 dB. Hloubka je u tohoto prvku nastavena na 100 dB a pro filtrování signálu je použit Besselův filtr, který má za úkol vyfiltrovat určité frekvence.

Dalším prvkem v této části je předzesilovač, který zesiluje výstupní signál (obr. 56). Pro tento účel je použit EDFA zesilovač. U tohoto zesilovače je zisk zesílení signálu nastaven na 17 dB a pro docílení co nejreálnějšího měření je přidán i šum, ten je nastaven na 6 dB.



Obr. 56: EDFA zesilovač v programu Optiwave

Dále je uvedena spektrální analýza z optického spektrálního analyzáru (OSA), který byl umístěn na výstupu z EDFA zesilovače. Na obrázku (obr.57) je možné vidět osm různých vlnových délek, znázorněny červeně. Je zde možné také vidět šum (ASE), který vyprodukoval zesilovač. Tento šum je na obrázku (obr.57) znázorněn zeleně.



Obr. 57: Spektrální charakteristika na výstupu zesilovače EDFA

7.1.2. Demodulace signálu

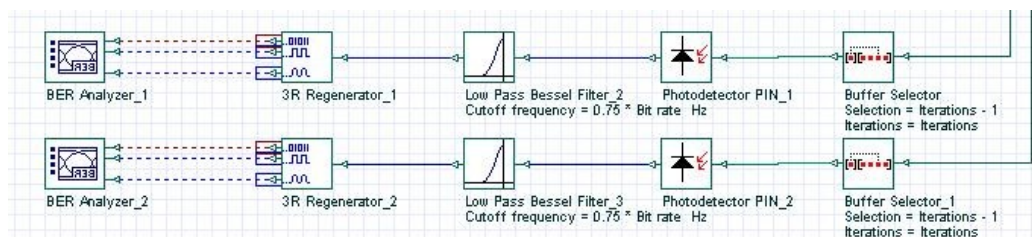
Následně je popsána demodulace a použité prvky na straně OLT jednotky (obr.58). Na vstupu se nachází Buffer selektor. Tento buffer umožňuje vybrání části signálu ze vstupního zásobníku.

Dále je zde umístěn fotodetektor. Jeho parametry jsou nastaveny následovně. Responsivita na 0,7 A/W a temný proud na 10 nA. U fotodetektoru je zapnut také ASE šum, pro dosažení co nejvíce reálného zapojení.

Dalším prvkem je Besselův filter, ten je nastaven jako dolní propust'. Tento filtr slouží pro ořezání vysokofrekvenčního šumu, který vzniká, když signál prochází trasou. K tomu dochází působením disperze, nelinearit atd. V našem případě je tento filtr nastaven na hodnotu 75% z celkové přenosové rychlosti.

Poté je použit 3R regenerátor. Ten zesiluje signál a také upravuje časovou základnu signálu a obnovuje i jeho tvar.

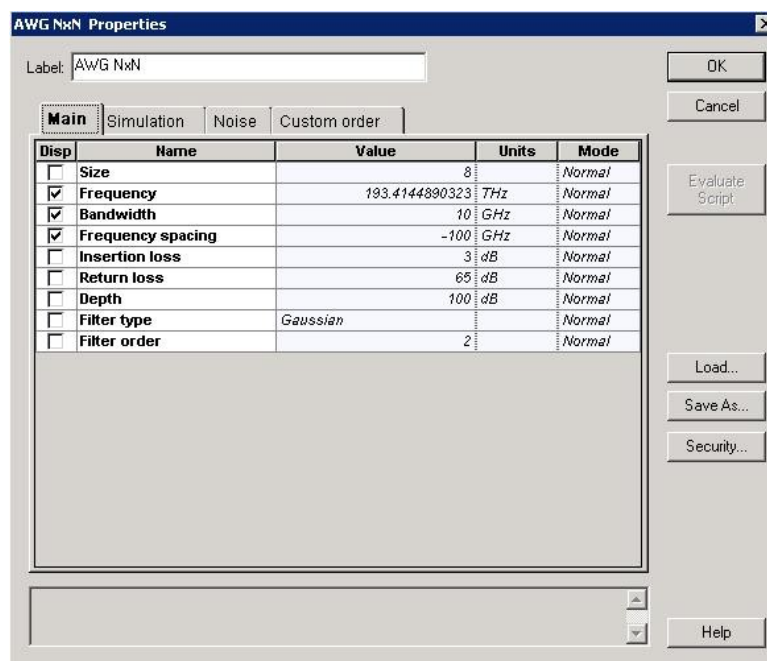
Posledním prvkem je BER analyzer. BER analyzer slouží pro získání hodnot a vlastností signálu, který prošel celou trasou. Díky tomu se můžeme dozvědět, jestli je signál vůbec ještě použitelný pro přenos nebo další údaje jako je diagram oka, Q faktor atd.



Obr. 58: Přijímací část OLT jednotky

7.2. Přenosová trasa

Tato část slouží pro samotný přenos signálu. Na trase je umístěn Power splitter, který signál rozděljuje na osm portů. Dále jsou na trase použity Cirkulátory, které přicházející signál směřují tam, kam patří. Dalším prvkem na trase je AWG 8x8 rozbočovač. AWG zajišťuje multiplexaci do jednoho optického vlákna. Nastavení tohoto prvku je uvedeno na obrázku (obr.59) níže.



Obr. 59: Nastavení AWG 8x8

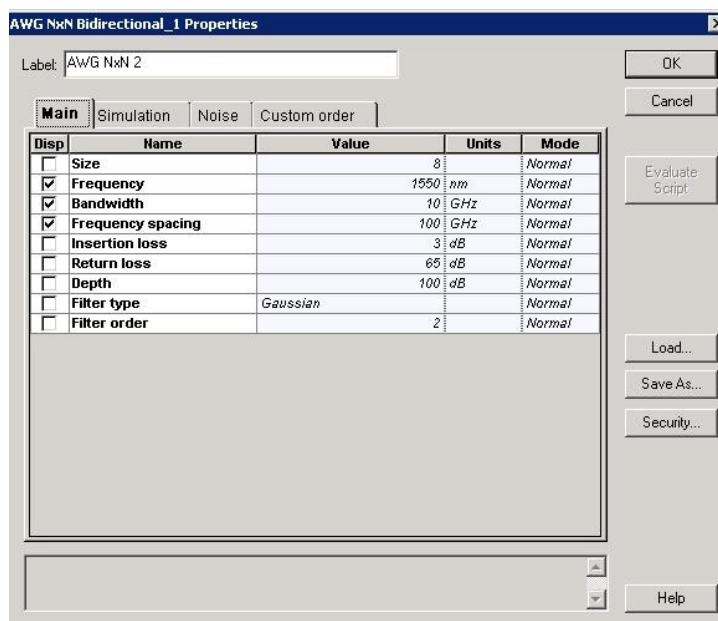
Frekvence je nastavena přibližně na 193 THz a šířka pásma je nastavena na 10 GHz. Dále je nastaven frekvenční odstup a to na -100 GHz, což opět odpovídá rozestupu 0.8 nm. Vložný útlum je 3dB a útlum je 65 dB. Hloubka je nastavena na 100 dB a je použit Gaussův filtr. Je důležité také zmínit, že nevyužité porty AWG routeru je třeba pro správnou funkčnost výpočtů v programu Optiwave ošetřit připojením optické nuly na tyto porty.

Následně jsou zmíněny parametry použitého optického vlákna. V knihovně programu Optiwave bylo vybráno přednastavené vlákno. Jelikož však komunikace probíhá obousměrně, je nutné zvolit obousměrné vlákno. Základní parametry použitého vlákna jsou totožné s vláknem standardu G.652 C/D. Jednotlivé parametry jsou uvedeny níže v tabulce (tab.1).

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Útlum	0.24	dB/km
Náběh disperze	0.075	ps/nm ² /km
Disperze	16.75	ps/nm/km
Teplota	300/27	K/C
Rayleighův zpětný rozptyl	$50 \cdot 10^{-6}$	1/km
Dynamický šum	3	dB
Délka	1,5,10,15,25,50	km

Tab. 1: Parametry vlákna G.652 C/D

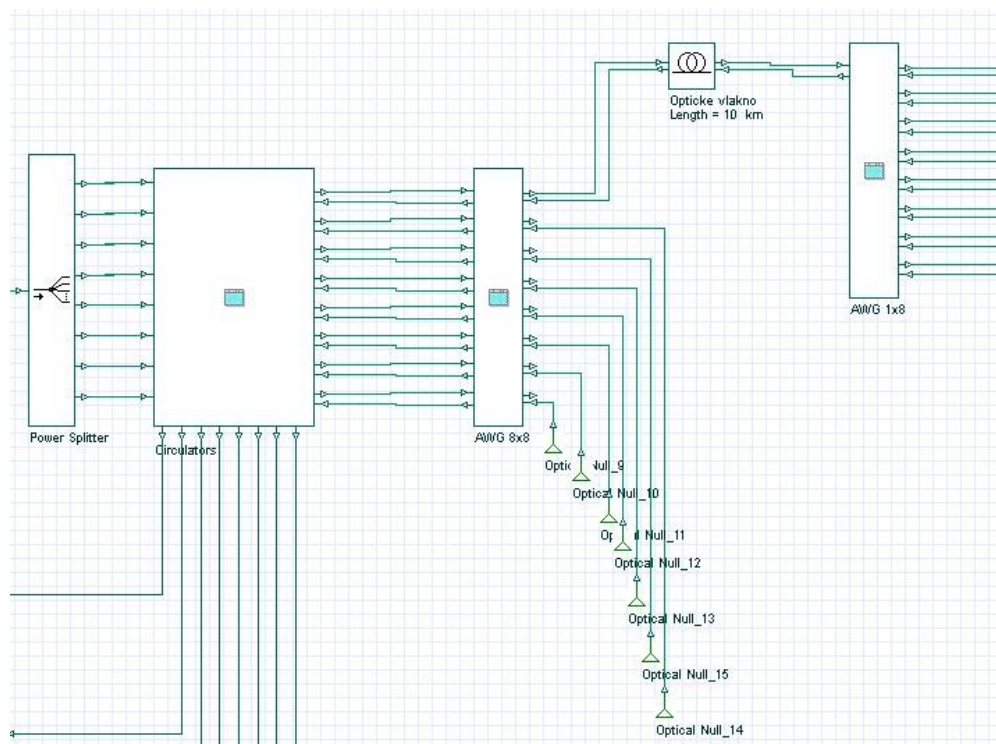
Posledním prvkem v přenosové části je AWG multiplexer. Tento multiplexer rozdělí signál z jednoho vlákna na osm. Na tento multiplexer jsou pak připojeny ONU jednotky. Těchto jednotek je osm. Dále na obrázku níže je uvedeno nastavení jednotlivých parametrů AWG multiplexeru. Toto nastavení (obr.60) je téměř shodné s nastavením již popisovaného AWG NxN routeru.



Obr. 60: Nastavení druhého AWG multiplexeru

Je třeba také zmínit, že pro správný výpočet přenosové trasy je nutné do trasy ve zpětném směru vložit optické zpožďovače. Tyto optické zpožďovače jsou důležité hlavně u komponent, které fungují v obou směrech. Vynechání optických zpožďovačů by u těchto komponent znamenalo, vypočítání pouze jednoho směru. V naší přenosové trase jsou umístěny celkem čtyři optické zpožďovače. U každého je nastaveno zpoždění na hodnotu jedna. Posledním krokem je nastavení počtu opakování simulace programu. Toto nastavení provedeme, když se dostaneme na záložku Layout Parameters. Poté Signals Iteration. Číslo, které musíme dosadit, si spočítáme podle vzorce $Z+1$, kde za písmeno Z dosadíme počet optických zpožďovačů v naší trase. U naší přenosové trasy to bude číslo pět [35].

Na obrázku (obr.61) níže je pro úplnou představu zobrazena celá přenosová trasa.



Obr. 61: Přenosová trasa

7.3. ONU jednotky

Onu jednotky představují většinou zakončení optické sítě na straně zákazníka. ONU jednotka také zajišťuje přenos signálu mezi sítí koncových uživatelů a optickou sítí.

7.3.1. Modulace signálu

Onu jednotka se skládá z cirkulátoru, který se stará o správné nasměrování signálu. Pro správnou funkci cirkulátoru je nutné na jeden jeho nevyužitý vstup připojit takzvanou optickou nulu.

Dále se tato část skládá ze stejných prvků, které byly použity pro konkrétní modulaci na straně OLT. Samozřejmě není použito pole laserů, ale pouze jeden laser. Frekvence laserů začíná od vlnové délky 1550 nm a dále se snižuje o 0,8 nm s každou další připojenou ONU jednotkou. Tento odstup odpovídá dělení DWDM. Na straně ONU jednotky není použit EDFA zesilovač.

7.3.2. Demodulace signálu

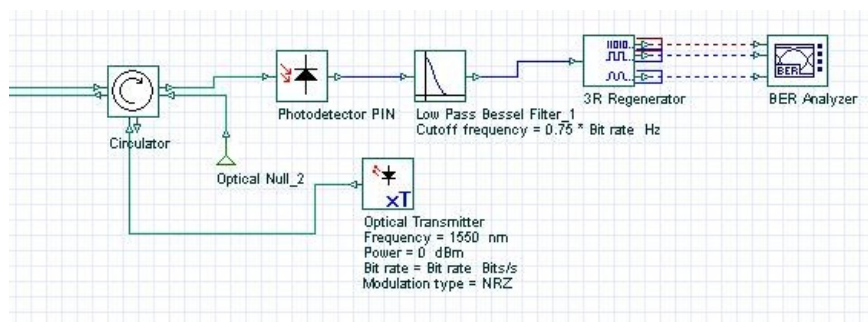
Demodulace signálu probíhá opět skoro totožně jako na straně OLT jednotky i přesto bude toto nastavení jednotlivých prvků popsáno.

Jako první je zde umístěn fotodetektor v podobě PIN diody, která byla popsána již v části popisu OLT jednoty. Nastavení fotodetektoru je následující. Responsivita je nastavena na 0,7 A/W a temný proud na 10 nA. U fotodetektoru je opět zapnut také ASE šum pro dosažení co nejvíce reálného zapojení.

Taktéž je v této části umístěna dolní propust' signálu realizována opět Besselovým filtrem a 3R regenerátor, který zesiluje signál a upravuje časovou základnu signálu a obnovuje i jeho tvar.

Posledním prvkem je BER Analyzer, který nám poskytuje informace o vlastnostech přijímaného signálu.

Následující obrázek (obr.62) znázorňuje jednotlivé prvky ONU jednotky, které byly popsány výše.



Obr. 62: Prvky ONU jednotky

8. Zapojení a simulace jednotlivých modulací v programu Optiwave

V této části práce jsou detailněji popsány modulace z teoretické části bakalářské práce. U jednotlivých modulací bude vysvětleno použití a nastavení jednotlivých prvků a jejich funkce. Dále jsou u každé modulace uvedeny některé naměřené hodnoty. Testování jednotlivých modulací je měřeno pro délky trasy 1, 5, 10, 15, 25, 50 km a při rychlostech 1,25, 2,5 a 10 Gb/s. V části pro zobrazení výsledků jednotlivých modulací jsou zobrazeny diagramy oka a parametry pro přenosové rychlosti 1.25 Gb/s a 10 Gb/s a délky vedení 5 km a 25 km. Tyto výsledky jsou měřeny pro vzestupný směr. Kompletní naměřené hodnoty lze nalézt v příloze k této bakalářské práci.

8.1. Sledované parametry

V této části jsou uvedeny a podrobněji popsány sledované parametry při simulacích jednotlivých modulací.

8.1.1. Bitová chybovost

Hodnota bitové chybovosti je používána jako jeden z hlavních parametrů při hodnocení kvality optického spoje. Bitová chybovost je ovlivněna šumy, nelinearitami a také působením disperze. Hodnota bitové chybovosti představuje poměr mezi počtem chybně přijatých bitů bE a celkovým počtem přijatých bitů p v závislosti na čase. Bitovou chybovost můžeme vyjádřit vztahem [24]:

$$BER = \frac{bE}{vp \times t} [-]. \quad (8.1)$$

Kde v je přenosová rychlost a t doba měření [37].

8.1.2. Q-faktor

Q-faktor nebo také Quality faktor. Pomocí Q-faktoru můžeme určit kvalitu signálu. Kvalita signálu je u tohoto parametru vypočítána podle odstupů signálu od šumu. Ve výpočtu Q-faktoru jsou obsaženy všechny šumy, nelinearity nebo také disperze. Tyto jevy negativně působí na kvalitu signálu a v důsledku toho zvyšují bitovou chybovost. Interpretace hodnoty Q-faktoru je jednoduchá, čím vyšší je jeho hodnota, tím vyšší je kvalita signálu. Q-faktor je vyjádřen následující rovnicí [37],

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} [-]. \quad (8.2)$$

Kde I_1 představuje logickou úroveň „1“, I_0 představuje logickou úroveň „0“, σ_1 představuje standardní odchylku logické úrovně „1“ a σ_0 představuje standardní odchylku logické úrovně „0“ [37].

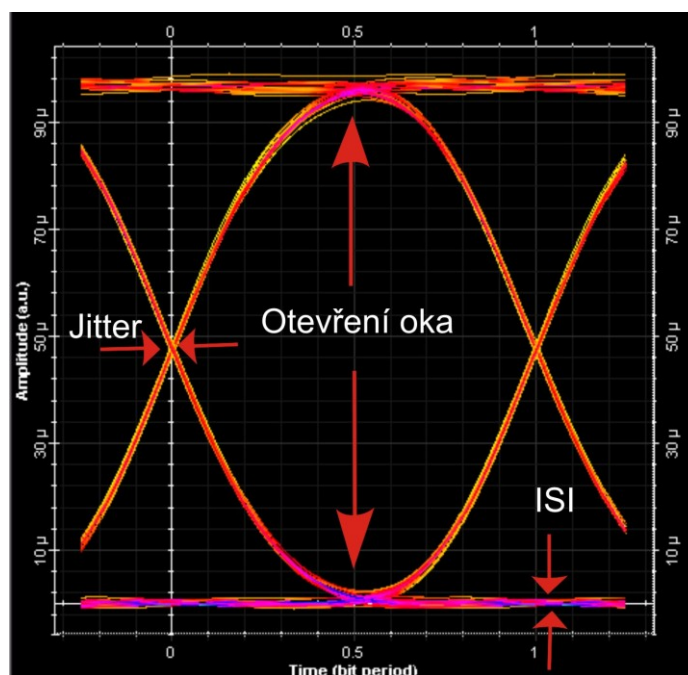
Kvalitu signálu podle hodnoty Q faktoru můžeme rozdělit přibližně následujícím způsobem (tab.2).

Hodnota Q faktoru	Kvalita signálu
Větší než 6	Vynikající
Mezi 5 až 6	Dobrá
Mezi 4 až 5	Akceptovatelná
Menší než 4	Signál je hůře detekovatelný, popřípadě už není detekován

Tab. 2: Hodnocení kvality signálu podle hodnoty Q faktoru

8.1.3. Diagram oka

Na diagramu oka je znázorněna superpozice všech navzájem překrytých bitů v signálu. Při hodnocení signálu na diagramu oka jsou rozhodující tyto tři ukazatele. Prvním z nich je takzvané „otevření oka“, což představuje rozeznatelnost logické 1 od logické 0. Jestli je oko více otevřené, je větší i rozeznatelnost, z důvodu většího odstupu signálu od šumu a tím je vyšší i kvalita samotného signálu. Druhým ukazatelem je ISI nebo také intersymbol interference. ISI je způsobeno překrytím jednotlivých modulačních impulsů. Posledním ukazatelem je takzvaný „Jitter“. Jitter představuje kolísání zpoždění a toto zpoždění je následně definováno jako krátkodobá odchylka digitálního signálu z jeho ideální pozice. Na následujícím obrázku (obr.63) níže je znázorněn diagram oka z vyznačenými parametry [37].

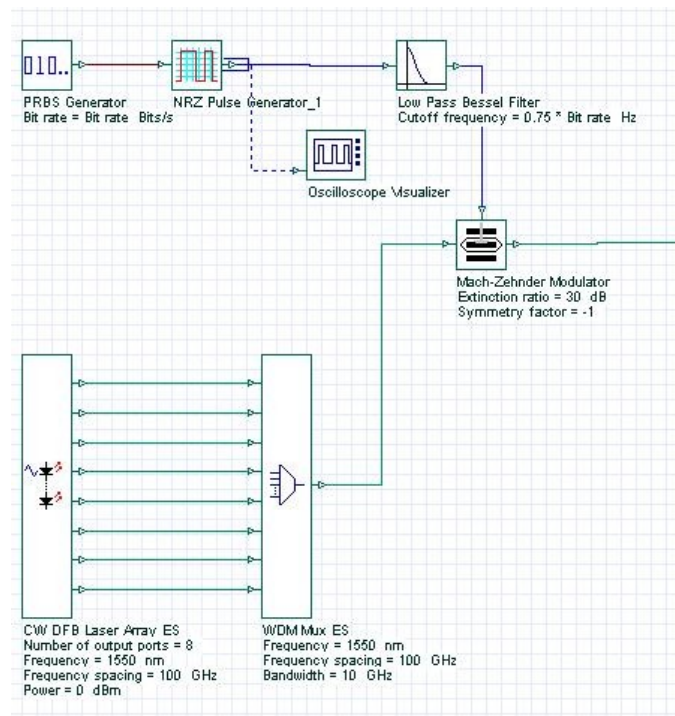


Obr. 63: Diagram oka s vyznačenými parametry [37]

8.2. Modulace NRZ

8.2.1. Modulace signálu

Nejdříve je uveden obrázek (obr.64), na kterém je znázorněna celá část pro modulaci signálu.



Obr. 64: Schéma modulace NRZ

Při vytváření modulace NRZ je jako první použit PRBS generátor neboli generátor pseudonáhodné frekvence bitů. PRBS generátor tím simuluje datový provoz v síti. Dále tento vygenerovaný elektrický signál putuje do NRZ pulzního tvarovače. NRZ pulzní tvarovač vytvoří NRZ elektrický signál. Jako další prvek je u tvorby NRZ modulace použit Besselův filtr, který je nastaven na hodnotu 75% z bitového toku a který slouží jako dolní propust'. Tento filtr ořezává vysokofrekvenční část signálu. Posledním prvkem je Mach-Zehnder modulátor. Modulátor slouží pro převedení elektrického signálu na optický a také pro namodulování NRZ signálu na optickou nosnou. Dále je uvedeno nastavení použitého Mach-Zehnderova modulátoru na obrázku (obr.65) níže.

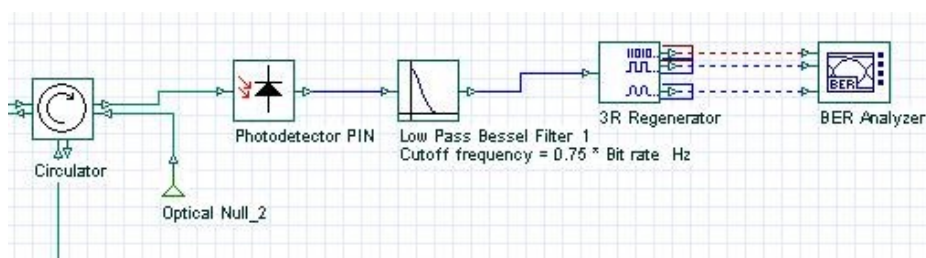
Label: Mach-Zehnder Modulator				
Main Simulation Custom order				
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Extinction ratio	30	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Negative signal chirp			Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Symmetry factor	-1		Normal

Obr. 65: Nastavení Mach-Zehnderova modulátoru

Vyzařovací výkon je nastaven na 30 dB a symetrický faktor je nastaven na hodnotu -1.

8.2.2. Demodulace signálu

Opět je nejdříve uveden obrázek (obr.66), na kterém je znázorněna celá část pro demodulaci signálu



Obr. 66: Demodulace NRZ signálu

Prvním prvkem je Cirkulátor, který nasměruje příchozí signál k fotodetektoru v podobě PIN diody. Fotodetektor má nastaveny tyto parametry. Responsivita je nastavena na 0,7 A/W a temný proud na 10 nA. U fotodetektoru je opět zapnut ASE šum, pro dosažení a simulaci reálného zapojení.

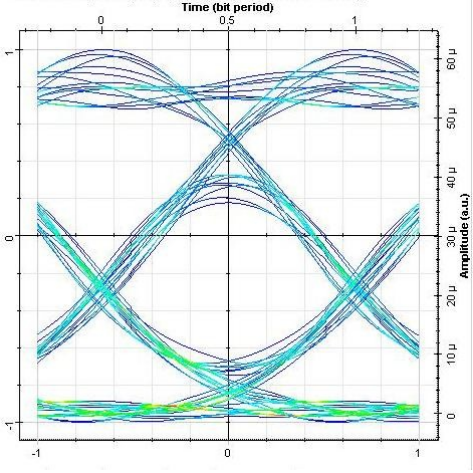
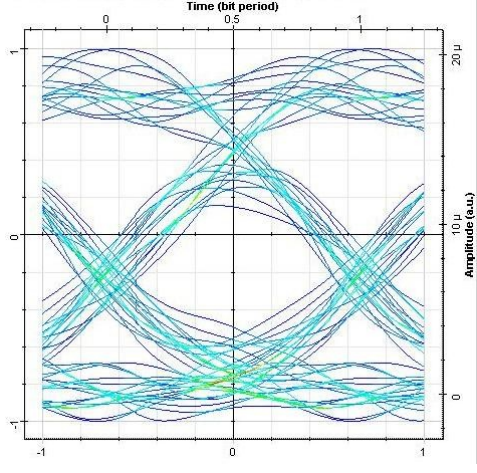
Poté je vysokofrekvenční signál ořezán dolní propustí realizovanou Besselovým filtrem, který je nastaven na hodnotu 0,75 z přenosové rychlosti. Dále signál pokračuje do 3R regenerátoru, který zesiluje signál a také upravuje časovou základnu signálu a obnovuje i jeho tvar.

Posledním prvkem je BER Analyzer, který nám poskytuje informace o vlastnostech a kvalitě přijímaného signálu.

8.2.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	63.0783	23.8023
Min.BER	0	1.56107e-125

Tab. 3: Výsledky simulací pro modulaci NRZ při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	5.0471	4.3109
Min.BER	2.04122e-007	7.72464e-006

Tab. 4: Výsledky simulací pro modulaci NRZ při přenosové rychlosti 10 Gb/s

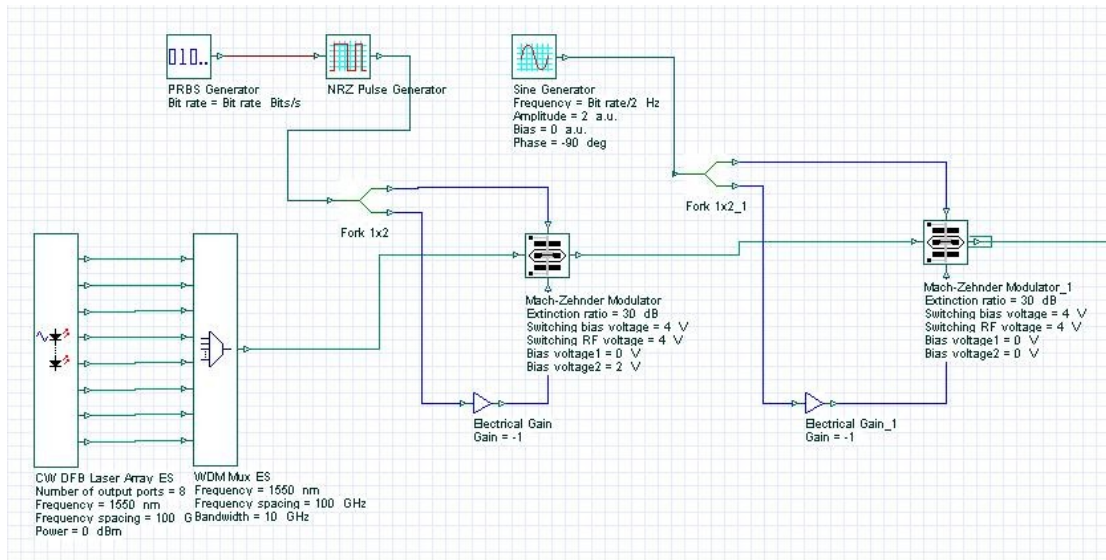
Modulace NRZ v jednotlivých simulacích dosahovala dobrých výsledků. V sestupném i ve vzestupném směru pro přenosovou rychlost 1.25 Gb/s a délku vedení 50 km byla kvalita signálu vynikající. Hodnota Q faktoru pro sestupný směr byla 19.9 a pro vzestupný směr 6.6. Pro přenosovou rychlost 2.5 Gb/s byl signál do délky vedení 25 km stále vynikající v obou směrech. Při délce vedení 50 km v sestupném směru byla kvalita signálu stále vynikající. Naopak pro vzestupný směr a pro délku vedení 50 km byla hodnota Q faktoru již jen 4.5. Podle této hodnoty lze signál ohodnotit jako ještě akceptovatelný. Pro přenosovou rychlost 10 Gb/s není tato modulace příliš vhodná. U této přenosové rychlosti se Q faktor pohyboval kolem hodnoty 4.5 pro všechny délky vedení.

Z výsledků vyplývá, že modulaci NRZ lze úspěšně použít pro nižší přenosové rychlosti. Tato modulace je také dobře použitelná pro délky vedení nejlépe do 25 km a to i bez použití zesilovače. Při použití zesilovače je však možné překlenout i vzdálenosti až 50 km.

8.3. Modulace RZ 33%

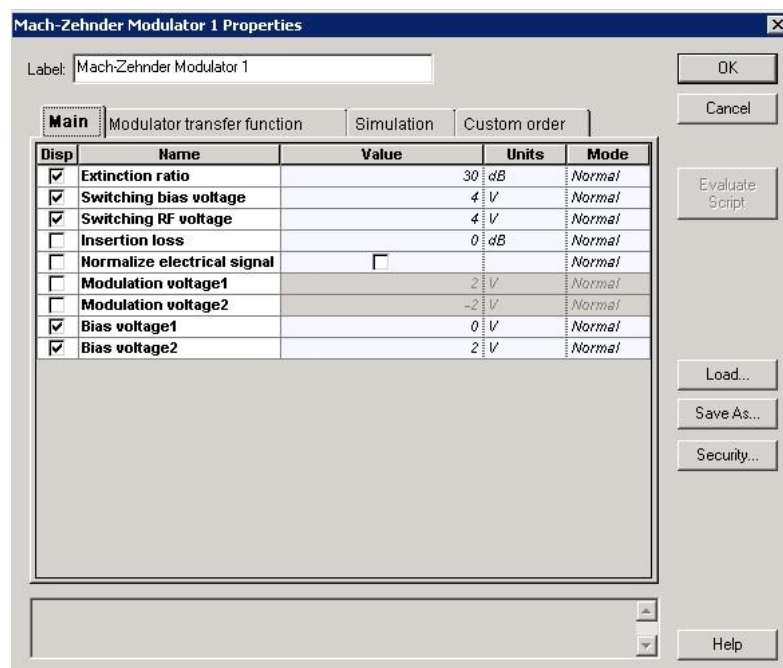
8.3.1. Modulace signálu

Nejprve je opět uveden obrázek (obr.67), na kterém je znázorněna celá část pro modulaci signálu.



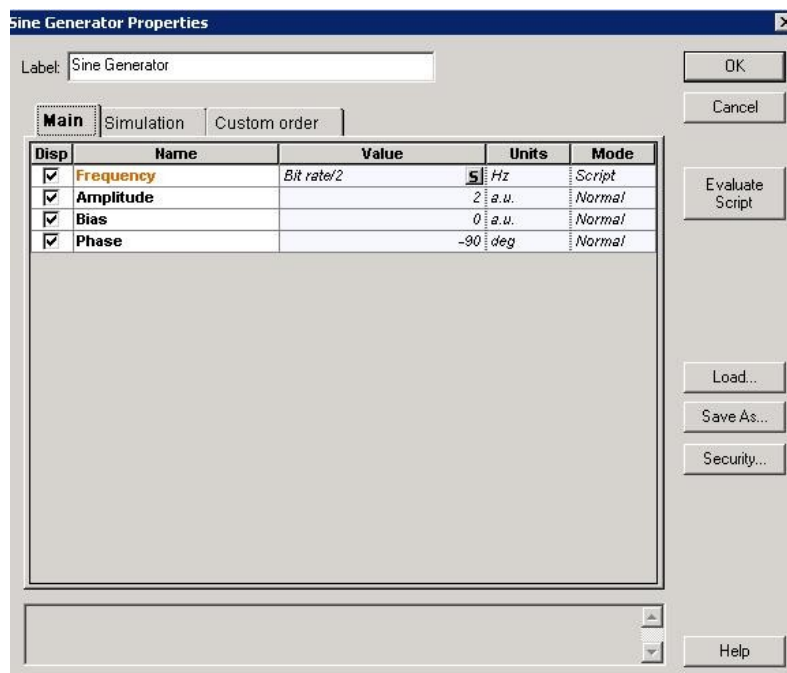
Obr. 67: Schéma modulace RZ 33%

V první části vytváření této modulace je opět pro generování provozu v síti použit PRBS generátor. Tento signál je poté upraven NRZ pulzním generátorem. Dále je signál rozděven vidlicí do dvou větví a směřován do Mach-Zehnderova modulátoru. Pro jednu větev je elektrický zisk signálu snížen o hodnotu -1. Nastavení prvního MZ modulátoru je uvedeno na obrázku (obr.68) níže.



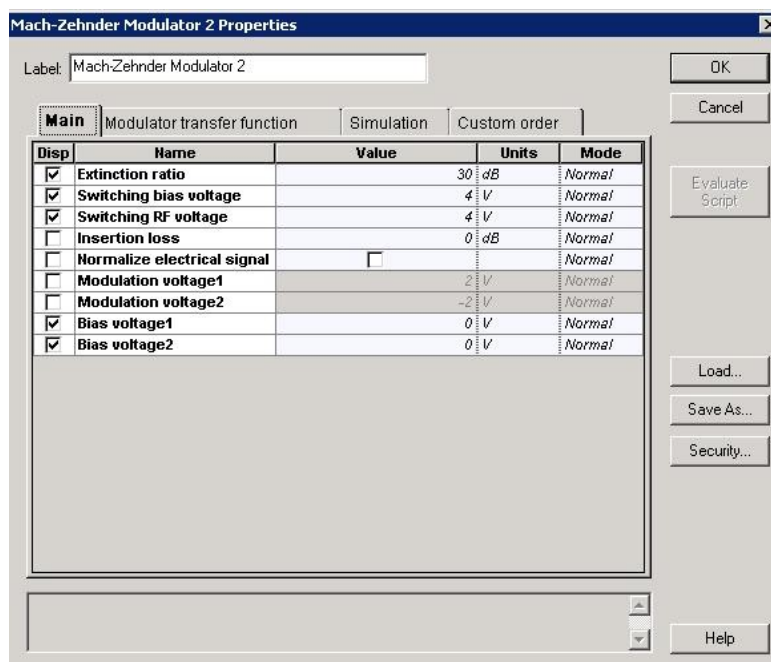
Obr. 68: Nastavení MZM 1 pro modulaci RZ 33%

Poté je již optický signál poslán do druhého Mach-Zehnderova modulátoru. Do tohoto modulátoru je přiveden sinusově namodulovaný signál s následujícím nastavením (obr.69).



Obr. 69: Nastavení sinusového generátoru při modulaci RZ 33%

Frekvence je nastavena na polovinu hodnoty přenosové rychlosti. Amplituda je nastavena na hodnotu 2 a.u. Bias je nastaven na hodnotu 0 a posun fáze je nastaven na -90 stupňů. Tento signál přiváděný do MZ modulátoru 2 je opět rozděven vidlicí a pro jednu větev je opět snížen elektrický zisk o hodnotu -1. Jako další jsou uvedeny (obr.70) nastavené parametry MZ modulátoru 2.

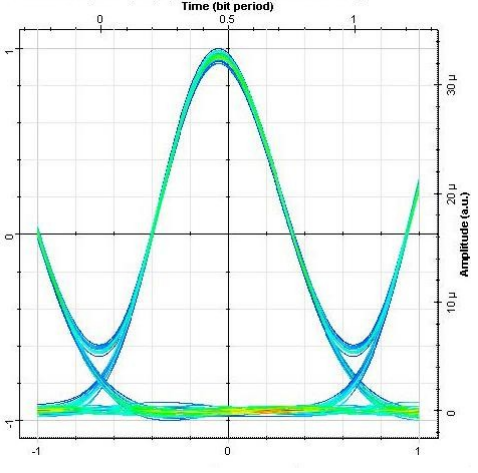
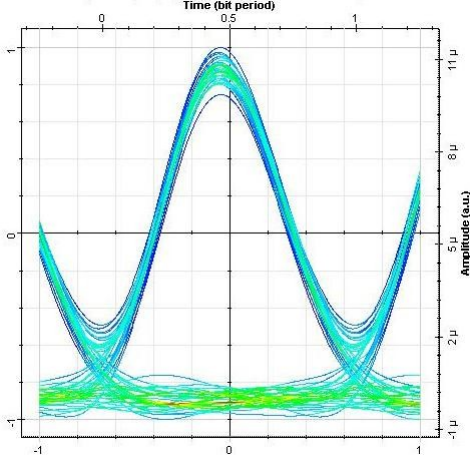


Obr. 70: Nastavení MZ modulátoru 2 pro modulaci RZ 33%

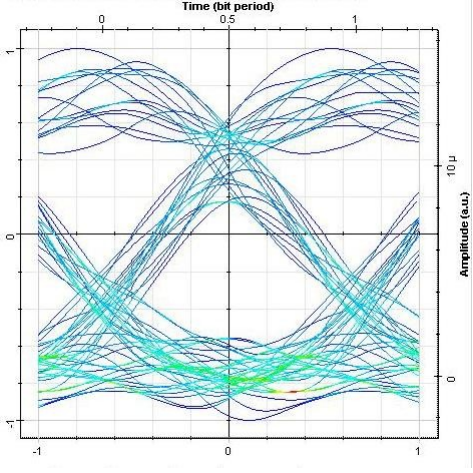
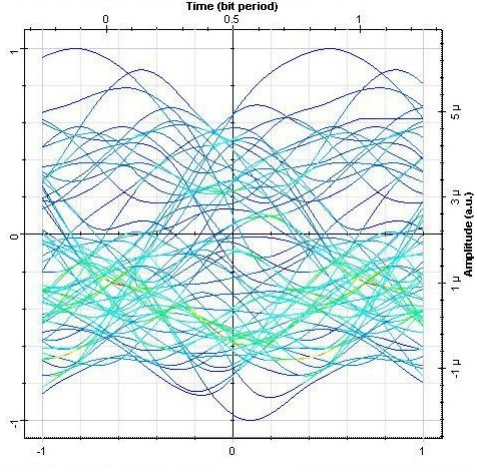
8.3.2. Demodulace signálu

Část pro demodulaci signálu zůstává stejná jako u modulace NRZ viz kapitola 8.2.2, a proto ji není nutné znovu popisovat.

8.3.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	58.3518	19.1314
Min.BER	0	6.78301e-082

Tab. 5: Výsledky simulací pro modulaci RZ 33% při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	5.0331	1.8405
Min.BER	2.36070e-007	0.03281

Tab. 6: Výsledky simulací pro modulaci RZ 33% při přenosové rychlosti 10 Gb/s

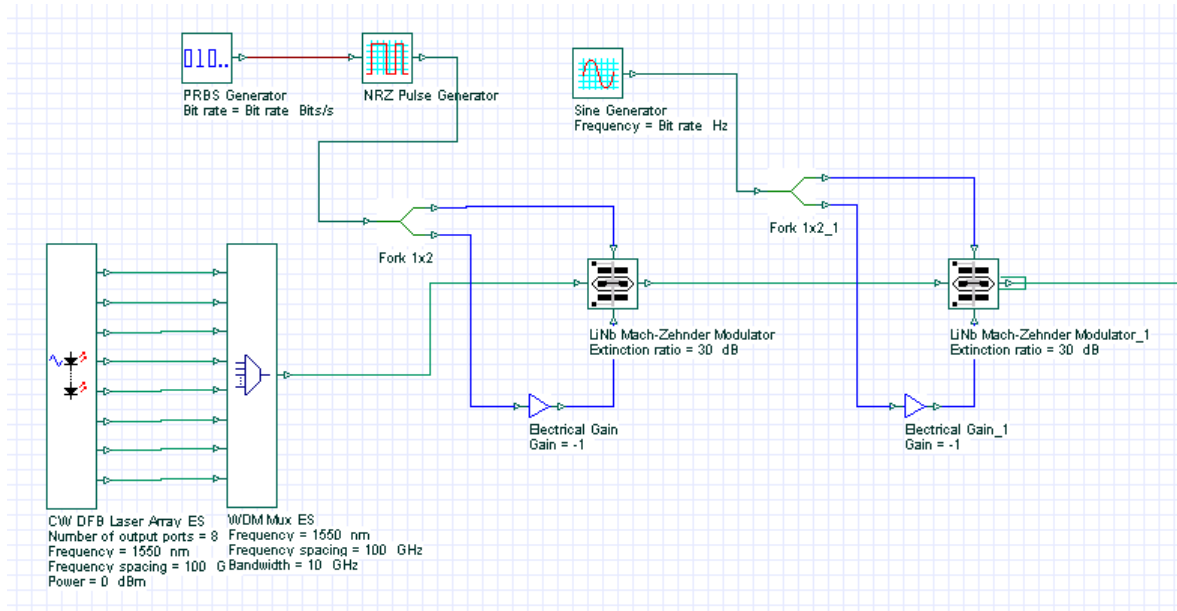
Modulace RZ 33% nedosahovala při simulacích příliš dobrých výsledků. Při přenosových rychlostech 1.25 Gb/s a 2.5 Gb/s byl signál vynikající do délky vedení 25 km pro vzestupný směr. Pro sestupný směr byl signál vynikající i při délce vedení 50 km. Při délce vedení 50 km pro vzestupný směr se signál zhoršil pro obě přenosové rychlosti. Při přenosové rychlosti 10 Gb/s pro vzestupný směr byla kvalita signálu akceptovatelná pouze do délky vedení 10 km. Poté Q faktor klesnul pod hodnotu 4, což znamená, že signál je již těžko detekovatelný. Pro sestupný směr byla kvalita signálu do délky vedení 10 km vynikající a do 25 km byla kvalita signálu akceptovatelná.

Z výsledků vyplývá, že modulaci RZ 33% je možné použít pro nižší přenosové rychlosti a do délky vedení 25 km i bez použití zesilovače. Pro navýšení překlenutelné vzdálenosti je však nutné zesilovač použít. Při zhodnocení této modulace, v porovnání s ostatními modifikacemi modulace RZ, dopadla tato modulace nejhůře.

8.4. Modulace RZ 50%

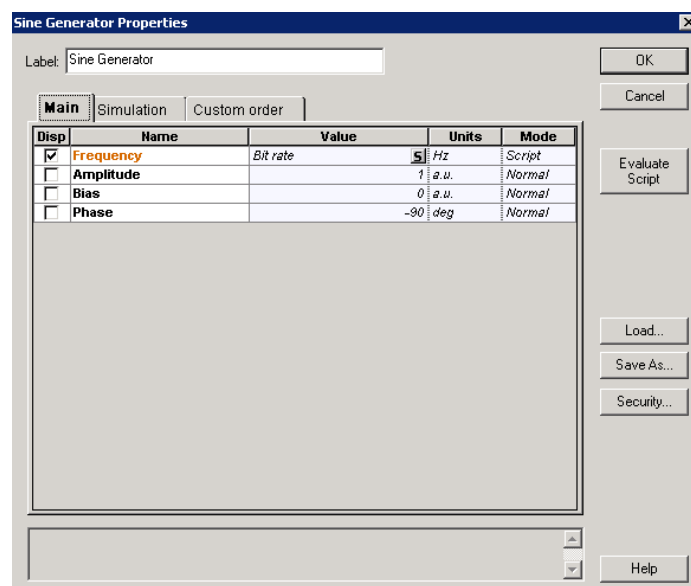
8.4.1. Modulace signálu

Na začátku je opět uvedeno schéma (obr.71) modulace RZ 50%. Toto schéma je totožné s modulací RZ 33%. Následně budou popsány parametry, které jsou u této modulace změněny.



Obr. 71: Schéma modulace RZ 50%

Nastavení parametrů u PRBS, NRZ pulzního generátoru a MZ modulátoru 1 zůstávají stejné. Změna nastává u nastavení sinusového generátoru. Jeho nastavení je uvedeno na následujícím obrázku (obr.72).



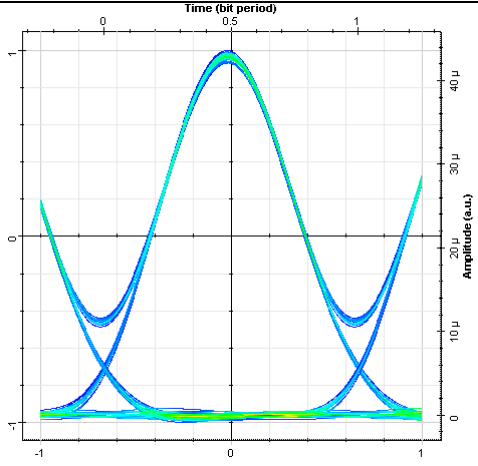
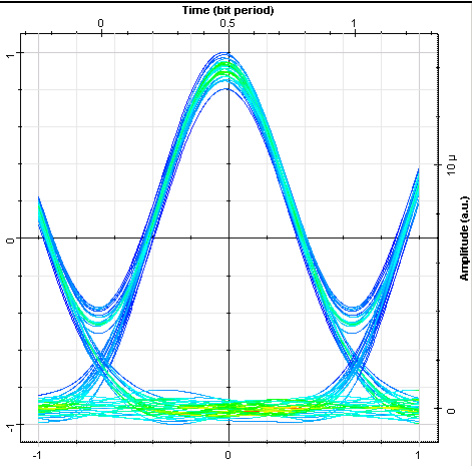
Obr. 72: Nastavení sinusového generátoru pro modulaci RZ 50%

Změnil se také parametr napětí Bias 2 u MZ modulátoru 2, které je u této modulace nastaveno na hodnotu 2.

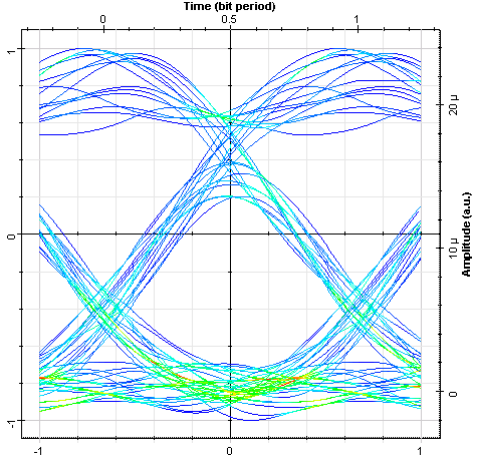
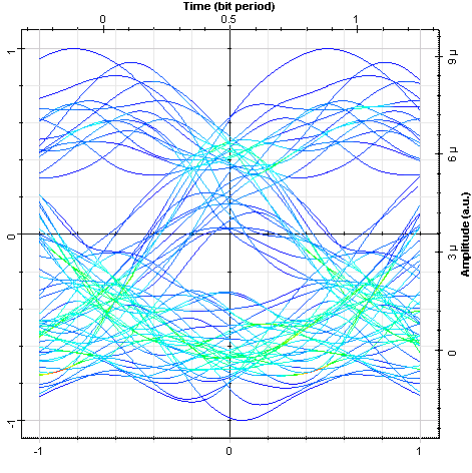
8.4.2. Demodulace signálu

Demodulace signálu je opět stejná jako u modulace NRZ, která je uvedena v kapitole 8.2.2.

8.4.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	72.4002	25.2360
Min.BER	0	7.90796e-141

Tab. 7: Výsledky simulací pro modulaci RZ 50% při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	6.1506	2.8991
Min.BER	3.54247e-010	0.00186

Tab. 8: Výsledky simulací pro modulaci RZ 50% při přenosové rychlosti 10 Gb/s

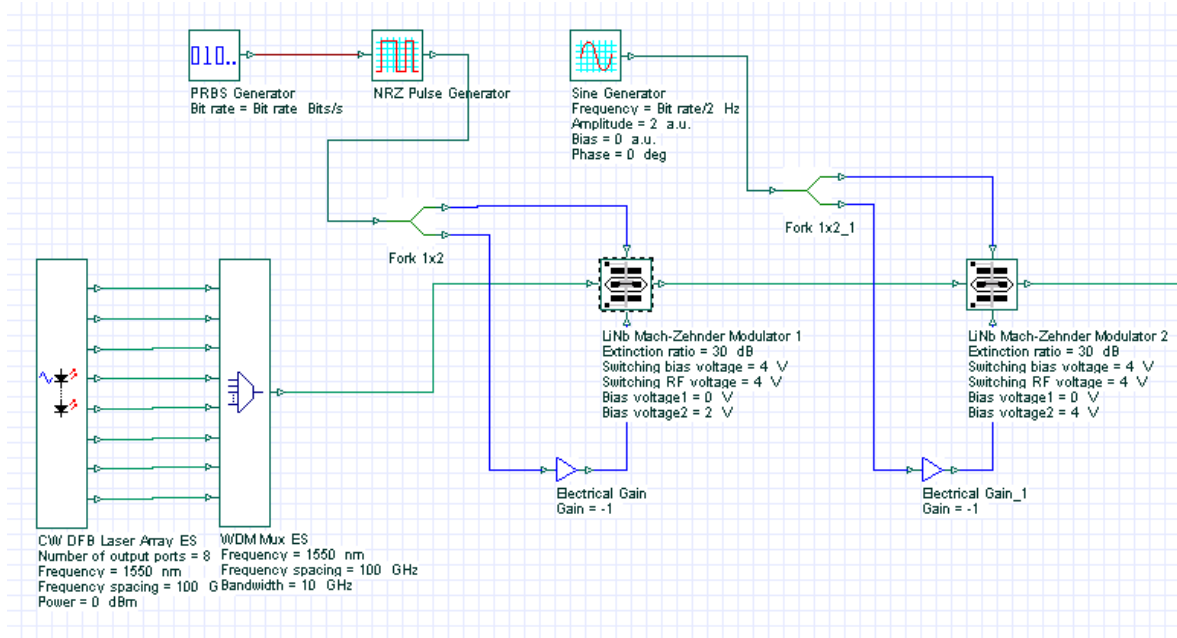
Modulace RZ 50% dosahovala lehce lepších výsledků než modulace RZ 33%. Při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s byl signál vynikající až do délky vedení 50 km v obou směrech. Pro vzestupný směr a pro přenosovou rychlost 2.5 Gb/s byl signál vynikající do délky vedení 25 km. Při této přenosové rychlosti a délce vedení 50 km byl signál stále hodnocen jako akceptovatelný, s hodnotou Q faktoru 4.5. Pro sestupný směr byla kvalita signálu vynikající i při délce vedení 50 km. Hodnota Q faktoru při této délce vedení byla 11.9. Při přenosové rychlosti 10 Gb/s pro vzestupný směr byla kvalita signálu vynikající do délky vedení 5 km a ještě stále akceptovatelná do délky vedení 15 km. Poté již byl signál těžko detekovatelný. Pro sestupný směr byla kvalita signálu vynikající až do délky vedení 15 km. Při délce vedení 25 km byla hodnota Q faktoru 5 a signál byl hodnocen jako akceptovatelný. Při délce vedení 50 km pro oba směry již nebyl signál detekován.

Z výsledků pro modulaci RZ 50% vyplývá, že je možné tuto modulaci při nižších přenosových rychlostech použít pro délku vedení až 50 km i bez použití zesilovače. Opět stejně jako modulace RZ 33% není tato modulace vhodná pro použití při vyšších přenosových rychlostech a zároveň při použití velkých délek vedení.

8.5. Modulace CSRZ 67%

8.5.1. Modulace signálu

Níže je uvedeno schéma (obr.73) modulace CSRZ.



Obr. 73: Schéma modulace CSRZ

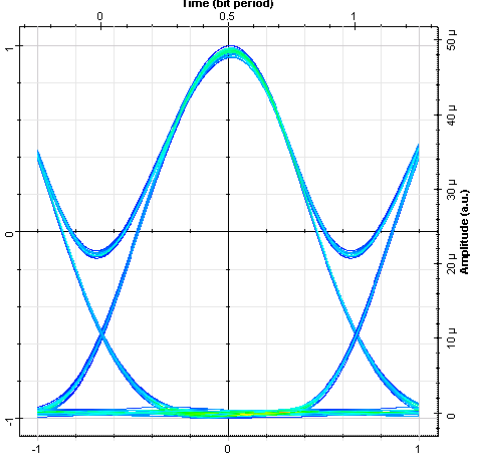
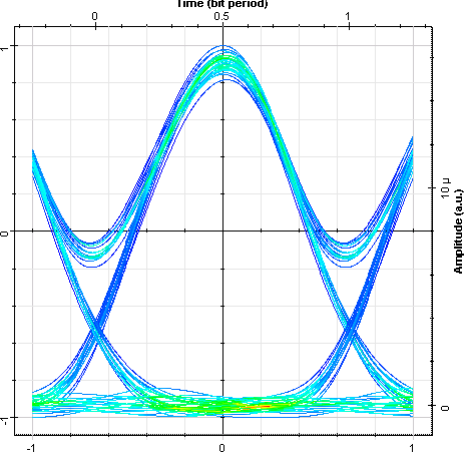
Toto schéma je opět totožné s různými druhy modulace RZ. Nastavení první části modulace je stejné. Změna nastává v nastavení sinusového generátoru. Ten je nastaven, jak můžeme vidět na obrázku (obr 73) výše, na poloviční přenosovou rychlost. Dále je amplituda nastavena na hodnotu 2 a.u. a hodnota Bias je 0. Fázový posun je taktéž nastaven na hodnotu 0.

Další změněný parametr je hodnota Bias napětí u MZ modulátoru 2. Ta je nastavena na 4 V.

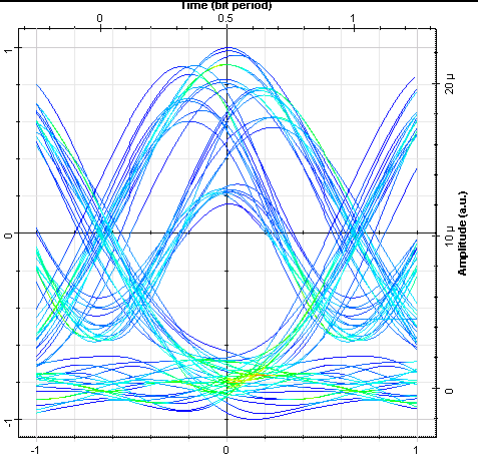
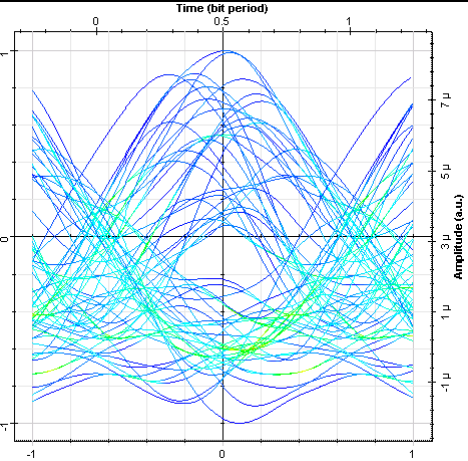
8.5.2. Demodulace signálu

Demodulace signálu u modulace CSRZ je opět stejná jako u modulace NRZ uvedenou v kapitole 8.2.2 a proto není nutné ji znovu uvádět.

8.5.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	79.9605	27.7525
Min.BER	0	7.92398e-170

Tab. 9: Výsledky simulací pro modulaci CSRZ 67% při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	4.1917	2.3471
Min.BER	1.14497e-005	0.00895

Tab. 10: Výsledky simulací pro modulaci CSRZ 67% při přenosové rychlosti 10 Gb/s

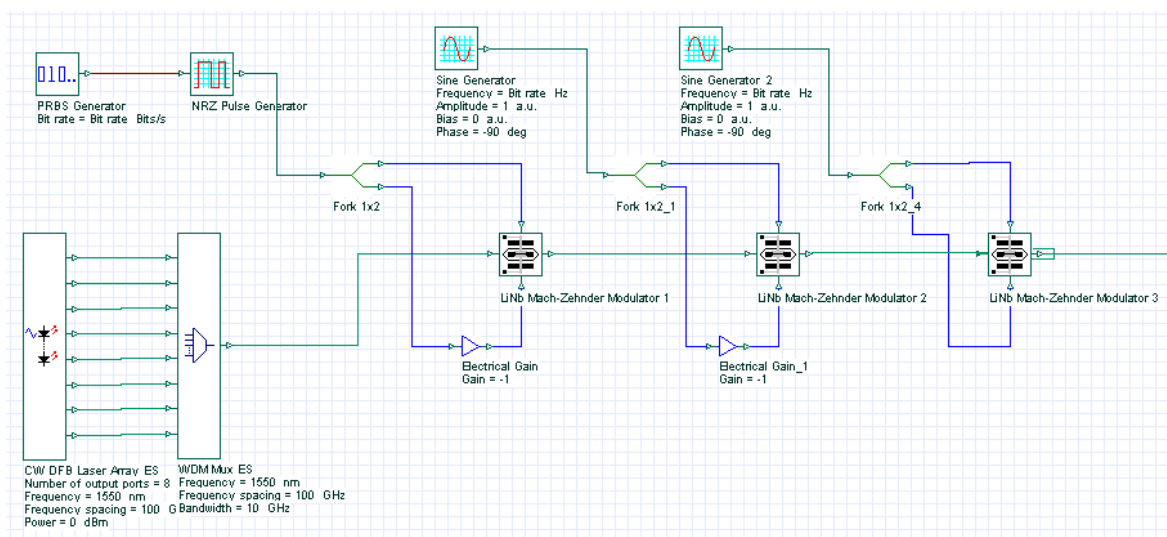
Modulace CSRZ 67% dosahovala podobných výsledků jako předcházející modulace RZ 50%. Při přenosových rychlostech 1.25 Gb/s a 2.5 Gb/s byla hodnota Q faktoru o něco málo lepší než u modulace RZ 50% a to jak pro sestupný, tak i pro vzestupný směr. Při přenosové rychlosti 10 Gb/s pro vzestupný směr byla kvalita signálu akceptovatelná pouze do délky vedení 5 km. Pro sestupný směr byla kvalita signálu akceptovatelná až do délky vedení 25 km. Pro délku vedení 50 km nebyl signál detekován a to v obou směrech.

Z výsledků pro modulaci CSRZ 67% vyplývá, že tato modulace je vhodná pro nižší přenosové rychlosti a při těchto přenosových rychlostech je možné tuto modulaci použít i pro délku vedení až do 50 km i bez použití zesilovače. Naopak tato modulace je méně vhodná pro použití při rychlostech 10 Gb/s.

8.6. Modulace CRZ

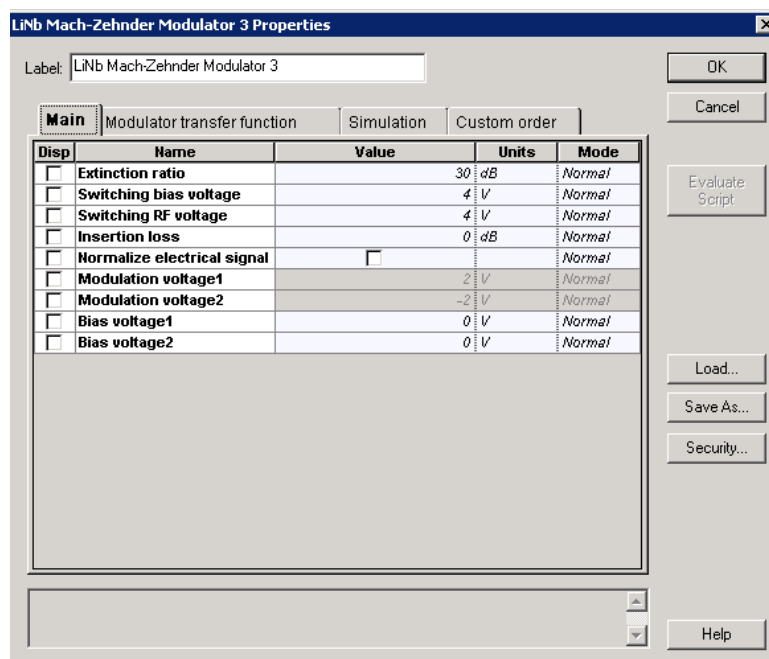
8.6.1. Modulace signálu

Nejdříve je uvedeno celkové schéma (obr.74) modulace CRZ.



Obr. 74: Schéma modulace CRZ

Nastavení první části modulace, tedy po MZ modulátor 1, zůstává stejné jako předcházející modulace CSRZ. Dále je k druhému modulátoru přiveden sinusový signál. Ten generuje generátor sinusového signálu. U tohoto generátoru je nastavena přenosová rychlost na standardní hodnotu a amplituda je nastavena na hodnotu 1 a.u. Dále je nastaven parametr Bias a to na hodnotu 0. Fázový posun je nastaven na -90 stupňů. Tento signál je rozdělen pomocí vidlice na dvě větve a pro jednu větev je elektrický zisk nastaven na hodnotu -1. Signál je následně přiveden do MZ modulátoru 2, který má totožné nastavení jako MZ modulátor 1. Pro tuto modulaci je použit ještě třetí modulátor. Jeho nastavení je uvedeno na obrázku (obr.75) níže.



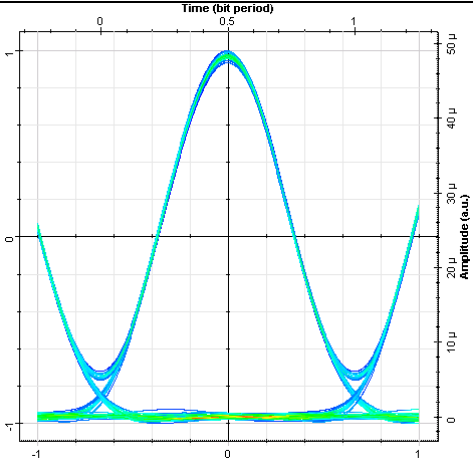
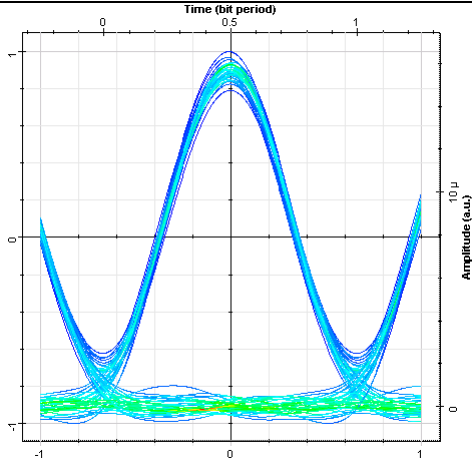
Obr. 75: Nastavení MZ modulátoru 3 pro modulaci CRZ

Do tohoto modulátoru je přiveden sinusový signál ze sinusového generátoru 2, který je nastaven totožně jako sinusový generátor 1.

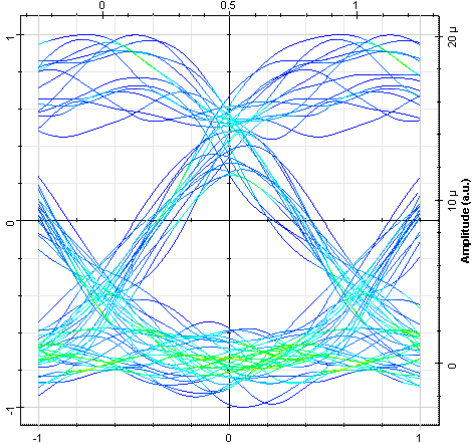
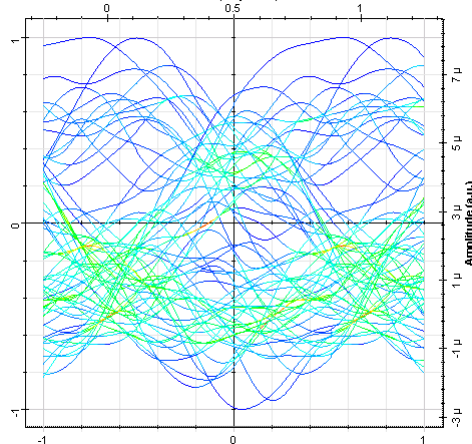
8.6.2. Demodulace signálu

Demodulace CRZ signálu probíhá opět stejně jako u modulace NRZ viz kapitola 8.2.2, a proto tuto demodulaci signálu není nutné znovu popisovat.

8.6.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	77.5775	25.3150
Min.BER	0	1.05508e-141

Tab. 11: Výsledky simulací pro modulaci CRZ při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	5.6861	2.1048
Min.BER	6.41548e-009	0.01764

Tab. 12: Výsledky simulací pro modulaci CRZ při přenosové rychlosti 10 Gb/s

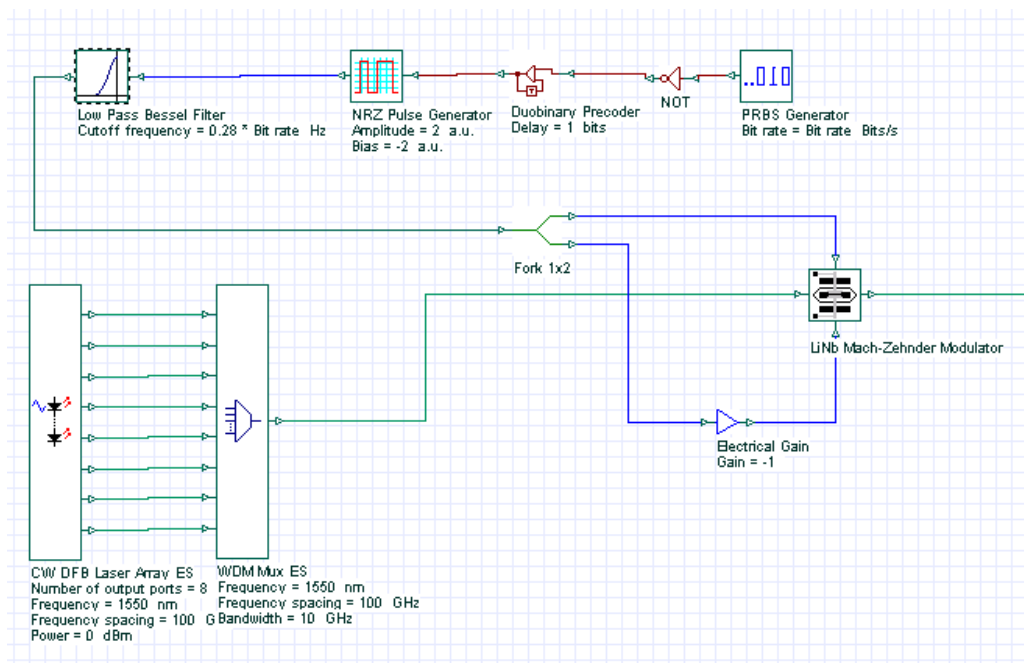
Modulace CRZ dosahovala podobných výsledků jako modulace CSRZ 67%. Při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s byl signál i při délce vedení 50 km pořád vynikající a to v obou směrech. Při přenosové rychlosti 2.5 Gb/s pro sestupný směr byla kvalita signálu vynikající až do délky vedení 50 km. Při stejné přenosové rychlosti pro vzestupný směr byl signál vynikající do délky vedení 25 km. Při stejné přenosové rychlosti a při délce vedení 50 km byla hodnota Q faktoru 4.04. Podle této hodnoty Q faktoru lze kvalitu signálu hodnotit už jako horší. Při přenosové rychlosti 10 Gb/s pro vzestupný směr byl signál vynikající jen při délce vedení 1 km a do délky vedení 10 km byl signál hodnocen ještě jako akceptovatelný. Při delší délce vedení už kvalita signálu rapidně klesala a signál byl hůře detekovatelný. Pro sestupný směr byla kvalita signálu vynikající až do délky vedení 15 km a pro 25 km byl signál ještě akceptovatelný. Pro délku vedení 50 km již signál nebyl detekován a to v obou směrech.

Z výsledků simulací pro modulaci CRZ vyplývá, že při nižších přenosových rychlostech je možné tuto modulaci použít i pro vedení délky až 50 km i bez použití zesilovače. Opět se ale potvrdilo, tak jako u většiny modulací skupiny RZ, že tento typ modulace není vhodný pro použití při vyšších přenosových rychlostech a při překlenutí delších vzdáleností bez použití zesilovače. Při zhodnocení této modulace v porovnání s ostatními modifikacemi modulace RZ dopadla tato modulace nejlépe.

8.7. Modulace DB

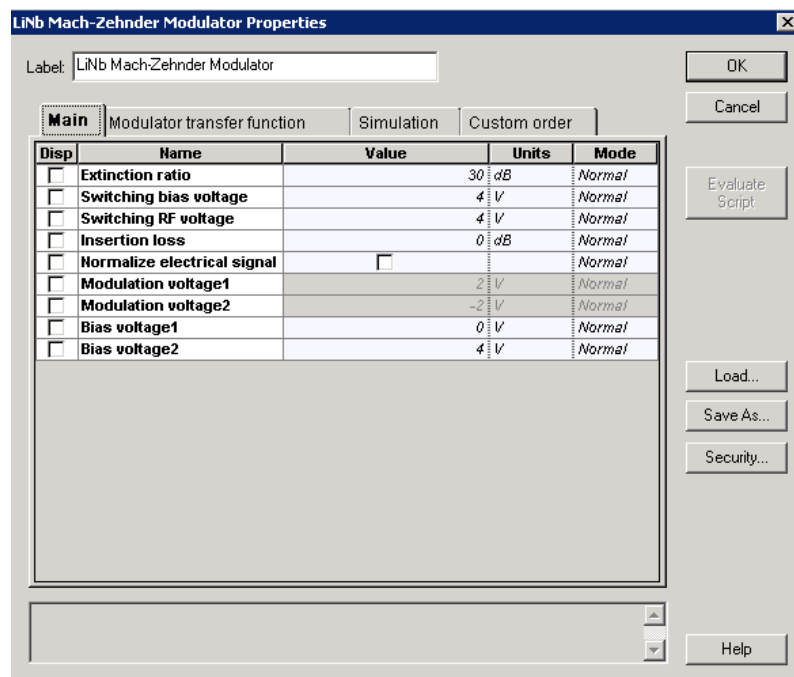
8.7.1. Modulace signálu

Na začátku popisu duobinární modulace je uvedeno celkové schéma (obr.76).



Obr. 76: Schéma duobinární modulace

Pro generování provozu v síti je použit PRBS generátor. Tento signál je posléze znegován a následně je v prekodéru přidáno zpoždění 1 bit/s. Poté je signál převeden na NRZ pulzy pulzním generátorem. U tohoto generátoru je nastavena hodnota amplitudy na 2 a.u. a hodnota Bias na -2 a.u. Signál je dále ořezán dolní propustí realizovanou Besselovým filtrem. Frekvence, při které dochází k ořezání, je u něj nastavena na 28 % z celkové přenosové rychlosti. Signál je dále rozdělen vidlicí na dvě větve. Do jedné větve je přidána komponenta pro navýšení elektrického zisku a její hodnota je nastavena na -1. Signál z těchto dvou větví pak putuje do MZ modulátoru. Ten daný elektrický signál převede na optický signál. Dále je uvedeno nastavení MZ modulátoru na obrázku (obr.77) níže.

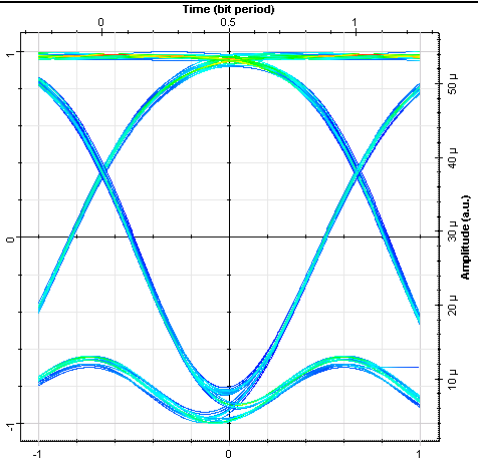
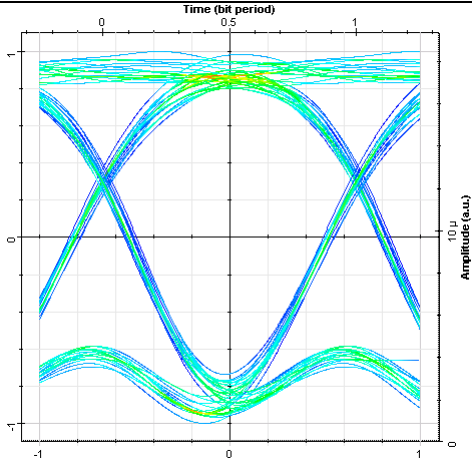


Obr. 77: Nastavení MZ modulátoru pro duobinární modulaci

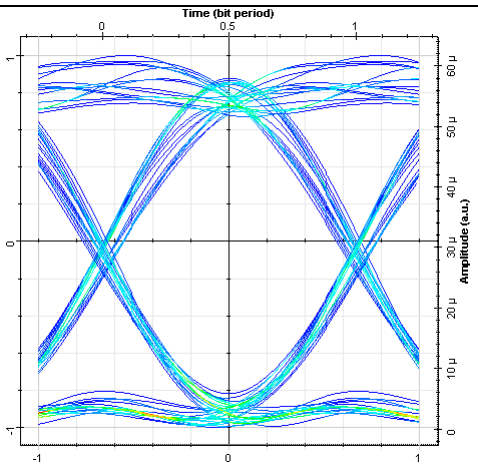
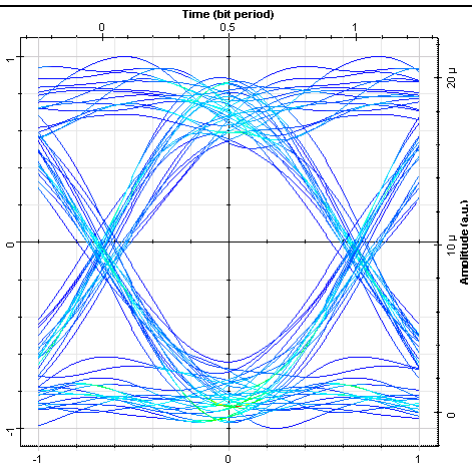
8.7.2. Demodulace signálu

Demodulace signálu je opět stejná jako v případě NRZ viz kapitola 8.2.2 a není ji nutné proto znovu uvádět.

8.7.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	25.7404	16.5189
Min.BER	1.71712e-146	1.32052e-061

Tab. 13: Výsledky simulací pro modulaci DB při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	17.4513	8.4795
Min.BER	1.67363e-068	1.12755e-017

Tab. 14: Výsledky simulací pro modulaci DB při přenosové rychlosti 10 Gb/s

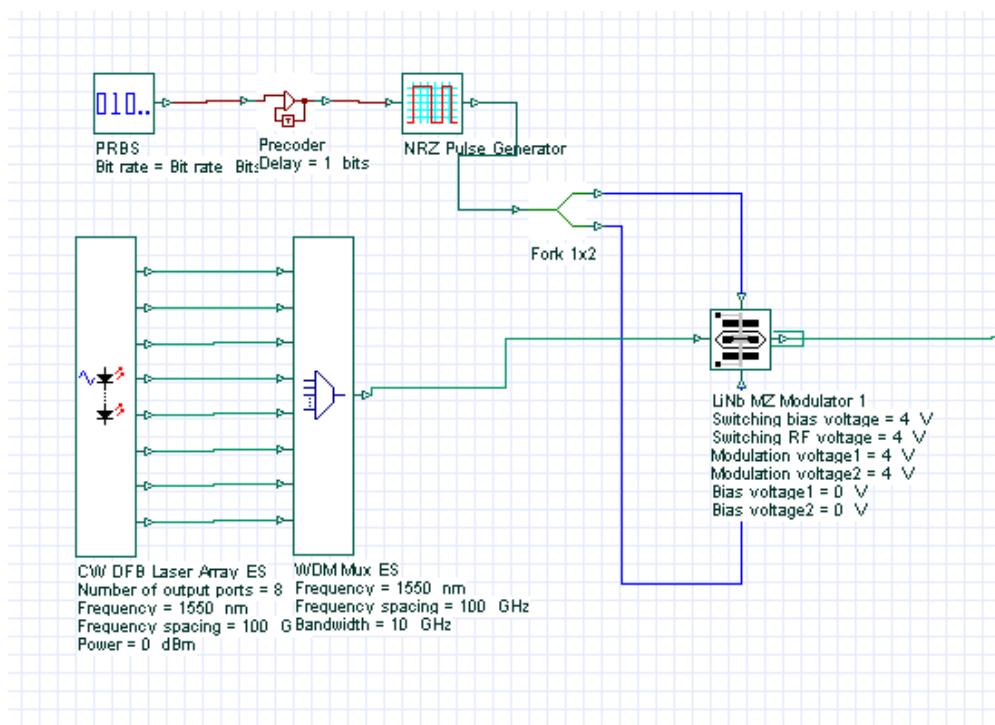
Duobinární modulace v simulacích dosahovala vynikajících výsledků. Při přenosových rychlostech 1.25 Gb/s a 2.5 Gb/s a délce vedení až 50 km byla kvalita stále vynikající a to jak v sestupném tak i ve vzestupném směru. Při přenosové rychlosti 10 Gb/s a při délce vedení 50 km pro sestupný směr byla hodnota Q faktoru 6.2, což odpovídá hodnocení signálu jako vynikající. Pro vzestupný směr při stejných parametrech byla kvalita signálu vynikající do délky vedení 25 km. Pro délku vedení 50 km byl již signál těžko detekovatelný.

Z výsledků simulací pro duobinární modulaci vyplývá, že tato modulace dosahuje vynikajících výsledků a to jak při nižších přenosových rychlostech, tak i při rychlostech 10 Gb/s. Také délka vedení může být s použitím zesilovače navýšena až na 50 km.

8.8. Modulace NRZ-DPSK

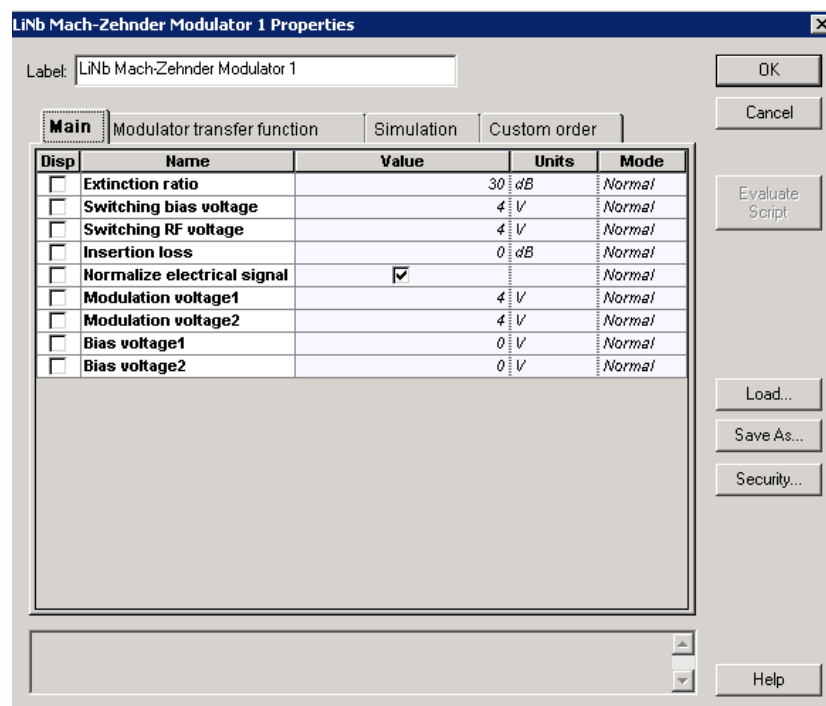
8.8.1. Modulace signálu

Na začátku je uvedeno schéma (obr.78) modulace NRZ-DPSK.



Obr. 78: Schéma modulace NRZ-DPSK

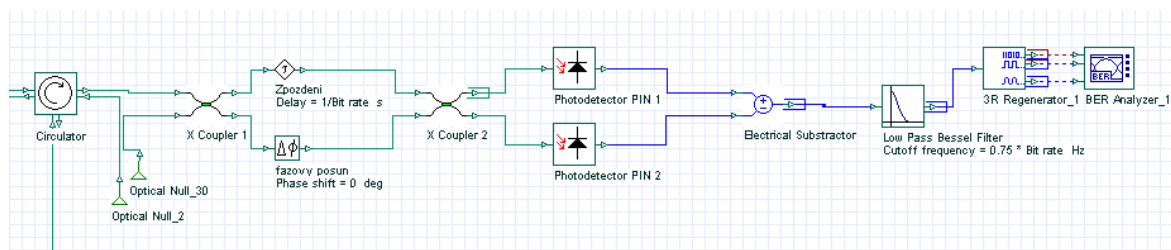
Pro generování provozu je opět použit PRBS generátor. Dále je na trase umístěn prekodér, který přidává zpoždění 1 bit. Signál je poté převeden NRZ pulzním generátorem na NRZ pulzy. Následně je signál rozdělen pomocí vidlice na dvě větve a putuje do Mach-Zehnderova modulátoru. Nastavení Mach-Zehnderova modulátoru je uvedeno na následujícím obrázku (obr.79).



Obr. 79: Nastavení MZ modulátoru pro modulaci NRZ-DPSK

8.8.2. Demodulace signálu

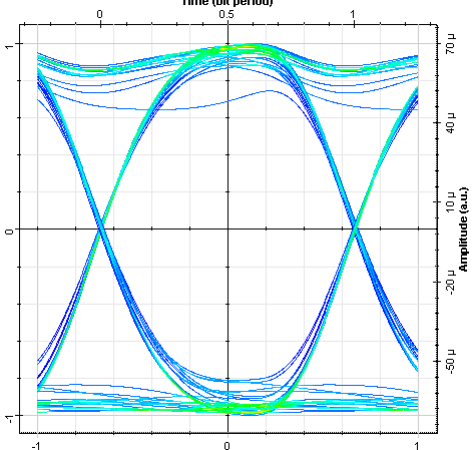
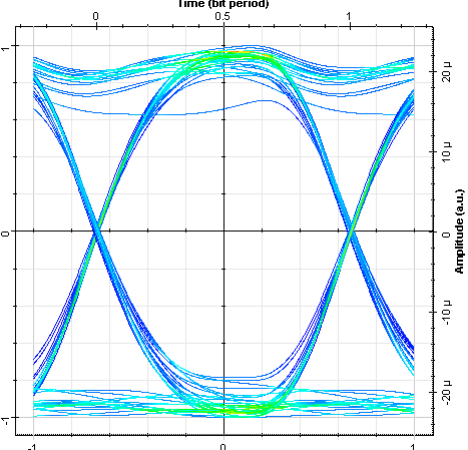
U modulace NRZ-DPSK neprobíhá demodulace signálu stejně jako u doposud probraných modulací výše. Na následujícím obrázku (obr.80) je zobrazeno schéma demodulace signálu.



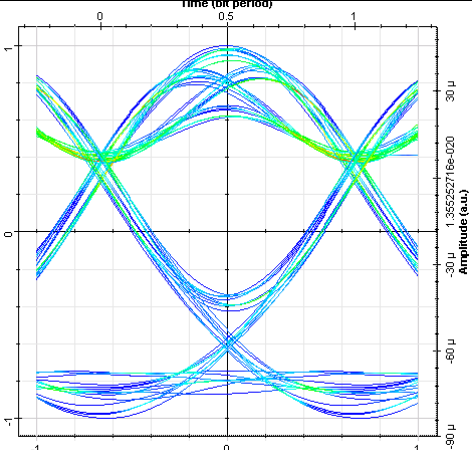
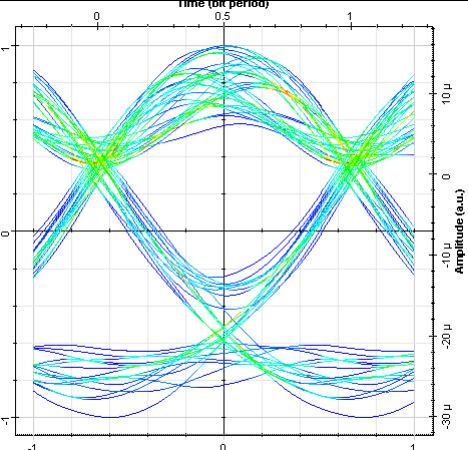
Obr. 80: Schéma demodulace signálu pro modulaci NRZ-DPSK

Signál je opět poslán nejdřív do cirkulátoru a ten ho následně přepošle dále k demodulaci. Následně je rozdělen do dvou větví. V jedné z nich je přidáno zpoždění 1 bit a ve druhé je fázový posun nastaven na 0 stupňů. Signál v každé větvi je poslán na fotodetektor. Poté jsou oba snímané signály z obou fotodetektorů od sebe odečteny pomocí komponenty Electrical subtractor. Následně už probíhá obvyklé zpracování signálu pomocí dolní propusti realizované Besselovým filtrem nastaveným na hodnotu $0.75 \times \text{přenosová rychlost}$. Pak je signál upraven pomocí 3R regenerátoru, který zesiluje signál a také upravuje časovou základnu signálu a obnovuje i jeho tvar. Posledním prvkem je BER analyzátor, který zobrazuje výsledky o kvalitě a parametrech signálu.

8.8.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	18.2457	16.0365
Min.BER	1.11852e-074	3.53980e-058

Tab. 15: Výsledky simulací pro modulaci NRZ-DPSK při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	5.2583	5.0994
Min.BER	7.18043e-008	1.68653e-007

Tab. 16: Výsledky simulací pro modulaci NRZ-DPSK při přenosové rychlosti 10 Gb/s

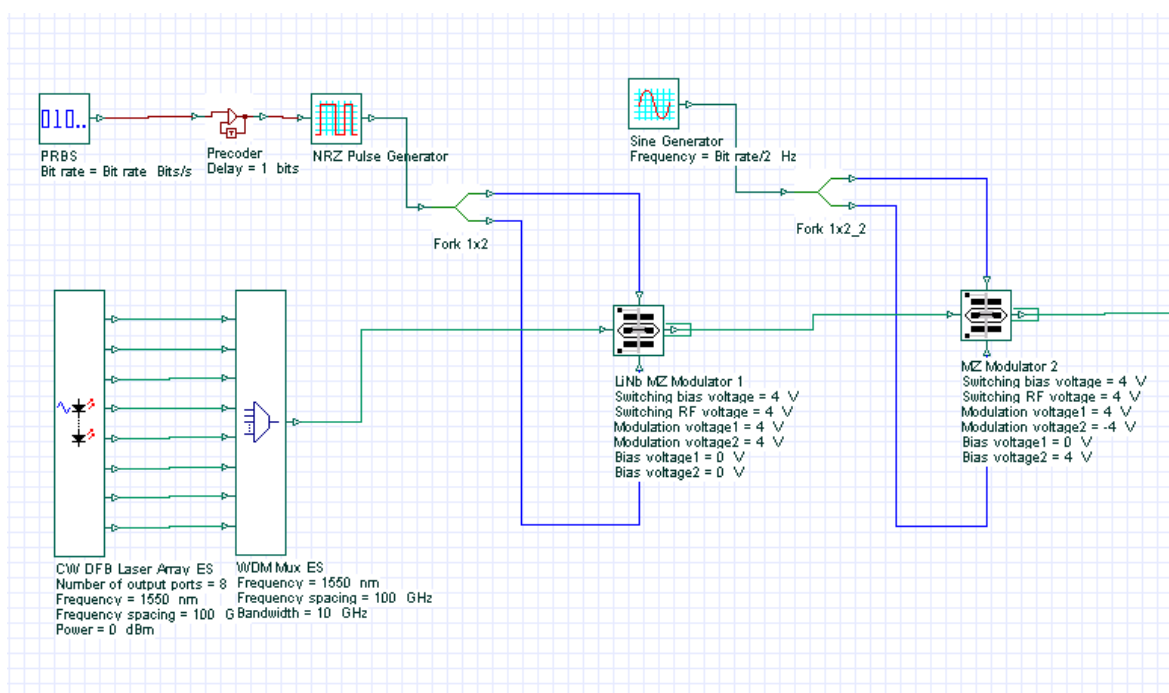
Modulace NRZ-DPSK dosahovala v simulacích velmi dobrých výsledků. V obou směrech při přenosových rychlostech 1.25 Gb/s a 2.5 Gb/s a délce vedení 50 km se hodnota Q faktoru pohybovala nad hodnotou 10, což odpovídá hodnocení signálu jako vynikající. Při přenosové rychlosti 10 Gb/s v sestupném směru nebyl signál detekován ani při délce vedení 1 km. To je zapříčiněno náchylností této modulace na šum. Pro vzestupný směr a délku vedení až 25 km byla kvalita signálu hodnocena jako dobrá a hodnota Q faktoru se pohybovala nad hodnotou 5. Pro délku vedení 50 km už byl signál těžce detekovatelný.

Z výsledků simulací pro modulaci NRZ-DPSK vyplývá, že tato modulace je vhodná pro použití při nižších přenosových rychlostech i na velmi dlouhé vzdálenosti. Při vyšších přenosových rychlostech a použití zesilovačů na trase není tato modulace vhodná z důvodu větší citlivosti na šum.

8.9. Modulace RZ-DPSK

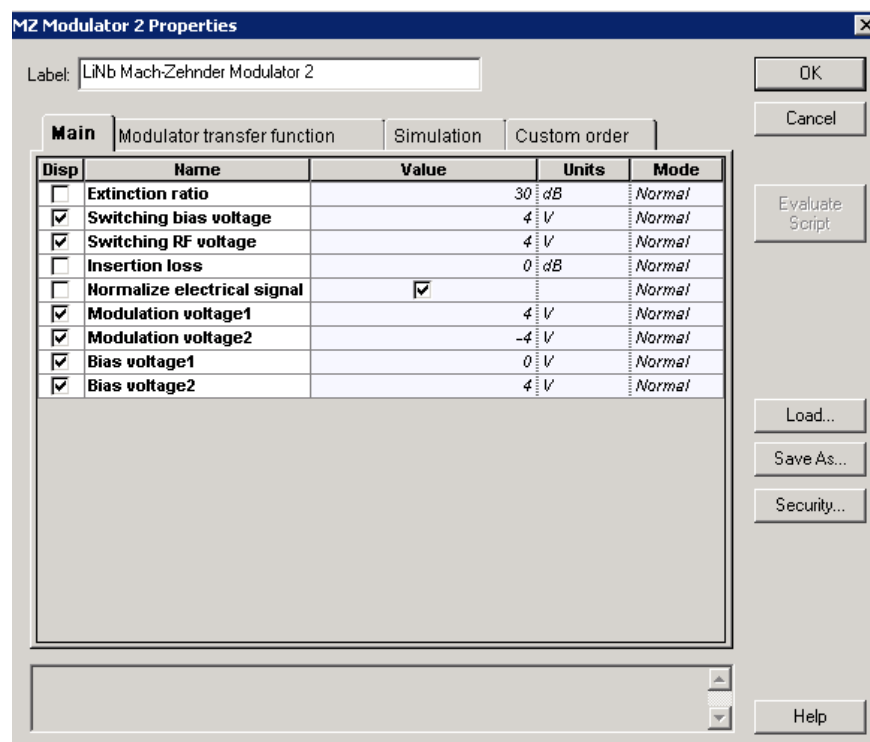
8.9.1. Modulace signálu

Nejdříve je uvedeno schéma (obr.81) modulace RZ-DPSK.



Obr. 81: Schéma modulace RZ-DPSK

První část této modulace je stejná jako u modulace NRZ-DPSK a je stejné i nastavení prvků. Změna nastává přidáním generátoru sinusového signálu a také přidáním druhého Mach-Zehnderova modulátoru. Nastavení generátoru sinusového signálu je následující. Frekvence byla nastavena na polovinu hodnoty přenosové rychlosti. Amplituda signálu je nastavena na 1 a.u. a jeho počáteční fáze je nastavena na 0 stupňů. Dále na obrázku (obr.82) níže je uvedeno nastavení Mach-Zehnderova modulátoru 2.

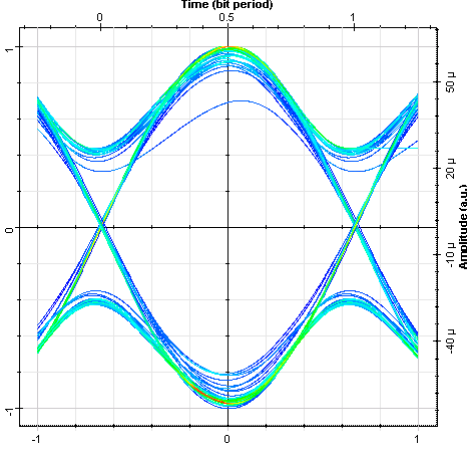
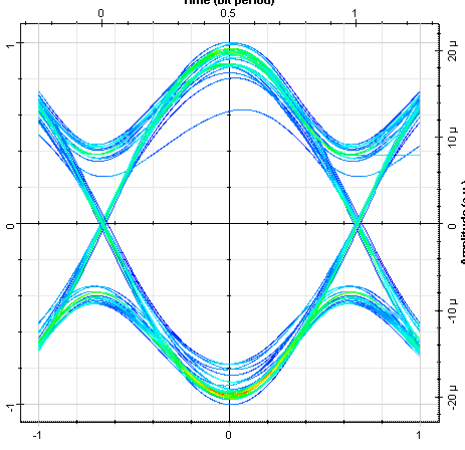


Obr. 82: Nastavení MZ modulátoru 2 pro modulaci RZ-DPSK

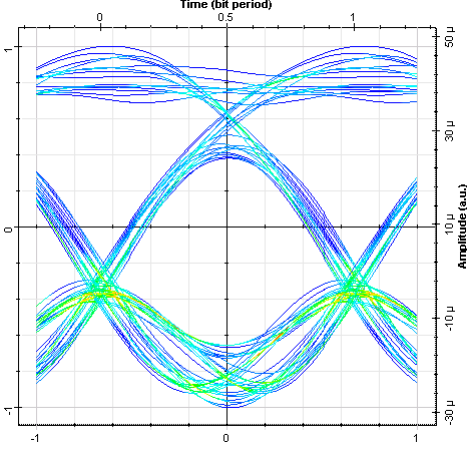
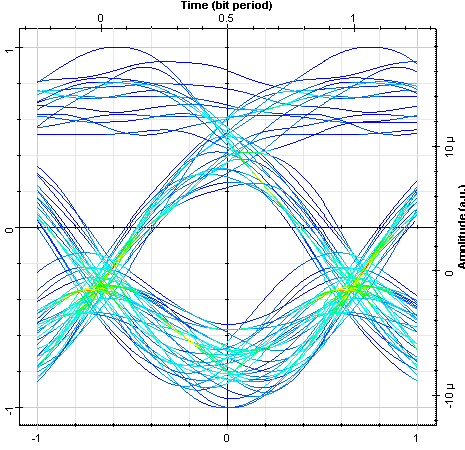
8.9.2. Demodulace signálu

Demodulaci signálu není nutné znovu popisovat, protože je stejná jako u modulace NRZ-DPSK viz kapitola 8.8.2.

8.9.3. Výsledky simulací

Přenosová rychlost 1.25 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	16.8370	14.3215
Min.BER	6.52863e-064	7.99445e-047

Tab. 17: Výsledky simulací pro modulaci RZ-DPSK při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s

Přenosová rychlost 10 Gb/s		
Délka vedení	5 km	25 km
Diagram oka		
Q faktor	6.4049	4.6872
Min.BER	7.40870e-011	1.37192e-006

Tab. 18: Výsledky simulací pro modulaci RZ-DPSK při přenosové rychlosti 10 Gb/s

Modulace RZ-DPSK dosahovala v simulacích obdobných výsledků jako modulace NRZ-DPSK. Při přenosových rychlostech 1.25 Gb/s a 2.5 Gb/s byla kvalita signálu vynikající až do délky vedení 50 km a to v obou směrech. Při přenosové rychlosti 10 Gb/s pro sestupný směr byla kvalita signálu vynikající až do délky vedení 25 km. Pro délku vedení 50 km při stejné přenosové rychlosti byla hodnota Q faktoru 4.1 a kvalita signálu je hodnocena ještě jako akceptovatelná. Pro vzestupný směr byla kvalita signálu vynikající do délky vedení 10 km. Při délce vedení 15 km byla kvalita signálu dobrá a při 25 km byla kvalita signálu ještě akceptovatelná. Při 50 km již nebyl signál detekován.

Z výsledků simulací pro modulaci RZ-DPSK vyplývá, že tuto modulaci lze použít při nižších přenosových rychlostech. I při vyšších přenosových rychlostech dosahuje tato modulace vynikajících výsledků i bez použití zesilovačů. Výhodou této modulace oproti modulaci NRZ-DPSK je její menší náchylnost k rušení způsobeného šumem. Tato modulace při testování v naší navržené WDM-PON síti dosahovala nejlepších výsledků ze všech testovaných modulací a to jak pro všechny testované přenosové rychlosti, tak i pro všechny testované délky vedení.

9. Animace v prostředí Macromedia Flash 8

Posledním bodem bakalářské práce je vytvoření animací WDM-PON sítě. Animace jsou vytvořeny jak pro sestupný, tak pro vzestupný směr. Při vytváření animací WDM-PON sítě bylo použito vývojové prostředí Macromedia Flash 8. V dalších částech bude popsáno prostředí tohoto grafického programu a také vytvořené animace WDM-PON sítě.

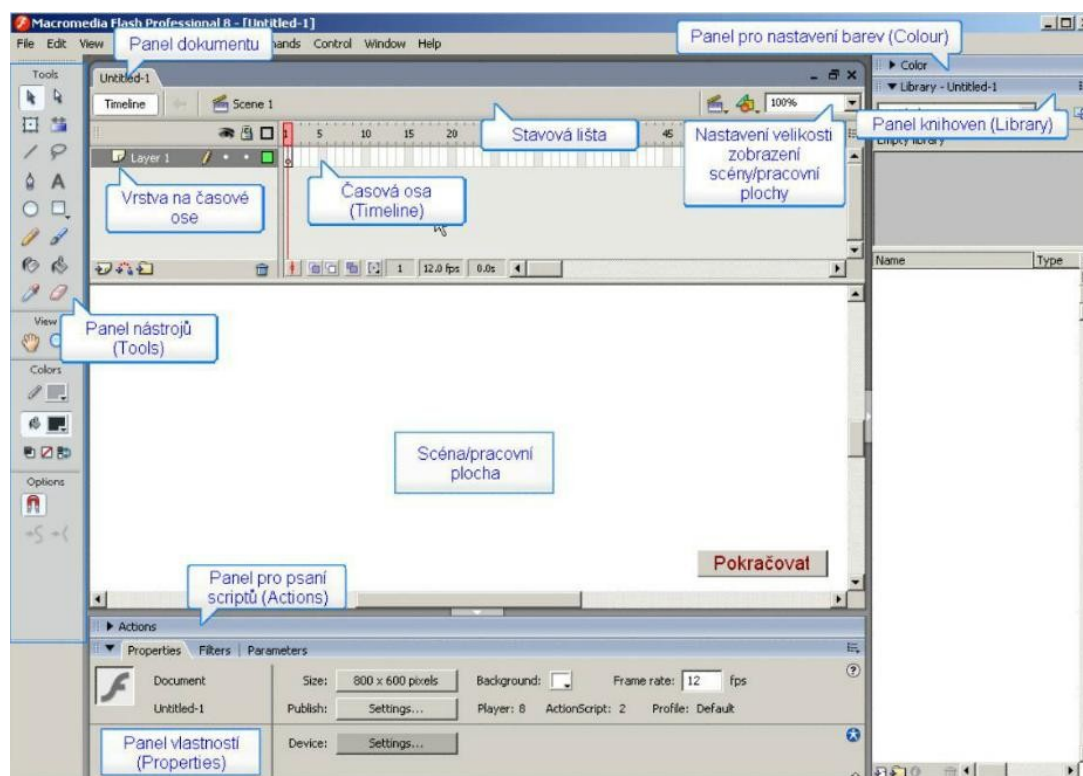
9.1. Pojem Flash

Pod pojmem Flash si je možno představit grafický vektorový program na tvorbu interaktivních animací. Lze v něm vytvářet různé internetové aplikace, popřípadě i prezentace nebo dokonce hry.

V programu Flash je také implementován programovací jazyk, který se nazývá ActionScript. Ten slouží k vývoji robustních aplikací a k využití všech možností moderní interaktivní animace.

9.2. Popis struktury prostředí

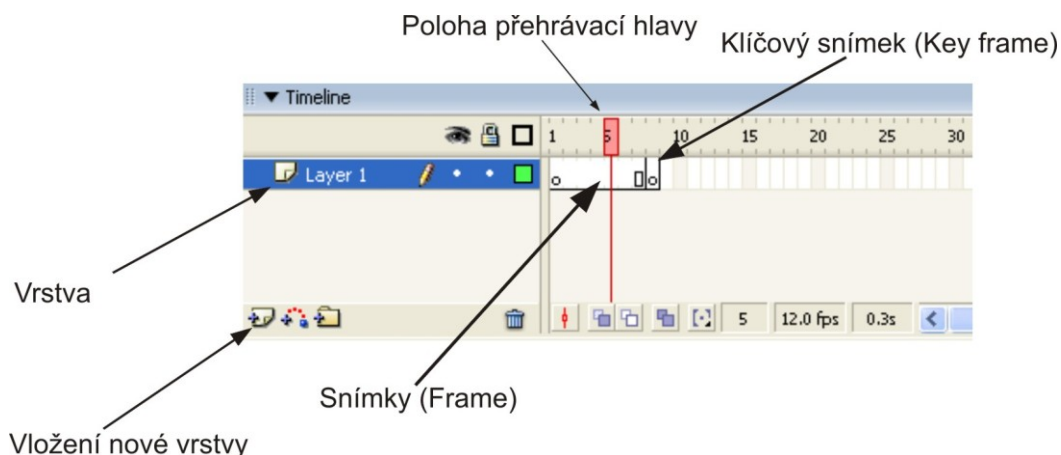
Prostředí grafického programu Macromedia Flash 8 je velice intuitivně navrženo. Přesto si popíšeme nejprve obecně celou aplikaci na obrázku (obr.83) níže. Poté budou detailněji popsány základní části programu a bude vysvětlena funkce těchto částí.



Obr. 83: Popis prostředí programu Macromedia Flash 8 [35]

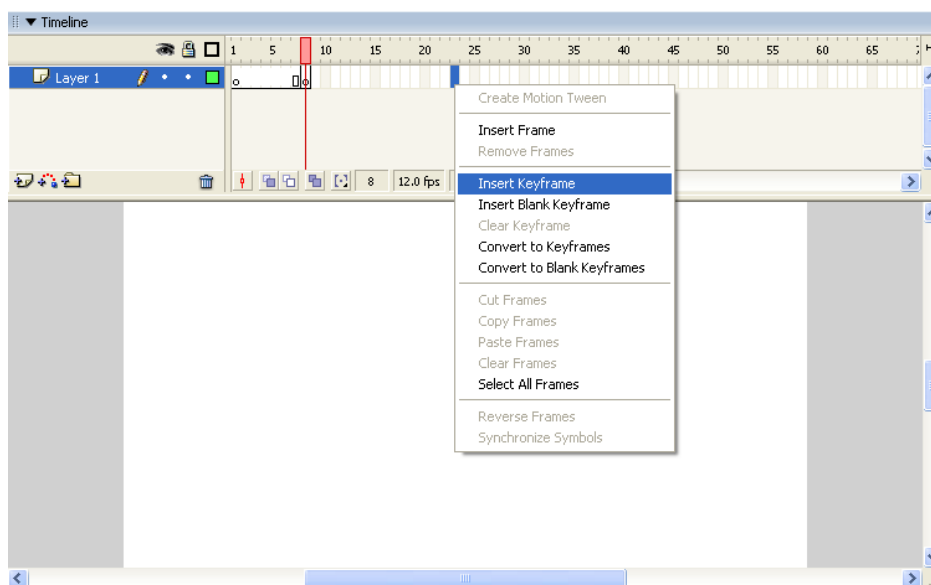
9.2.1. Časová osa a vytváření vrstev

Pro celkový přehled je uveden obrázek (obr.84) popisující dále probírané části programu pro tvoření animací.



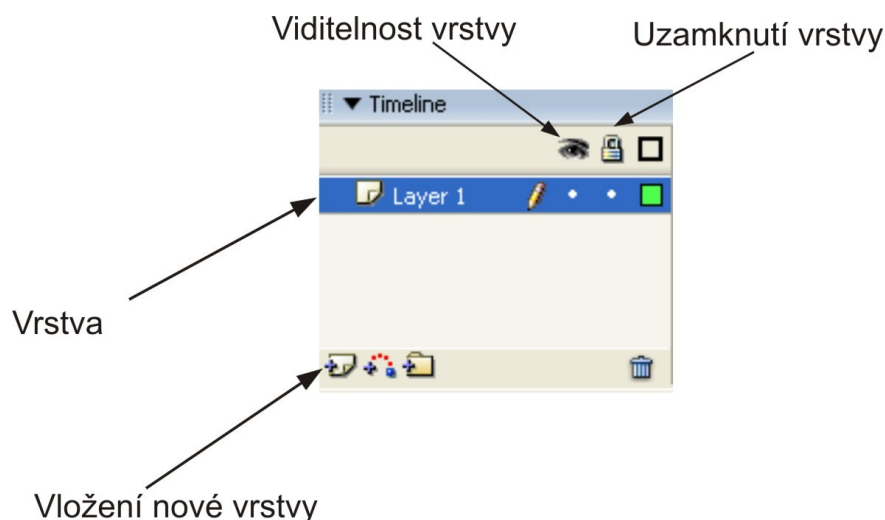
Obr. 84: Vytváření vrstev a časová osa v programu Macromedia Flash 8

Velice důležitým prvkem pro vytváření animací v programu Macromedia Flash 8 je časová osa. Pomocí časové osy docílíme samotné animace. Na časovou osu se přidávají snímky (Frame) nebo takzvané klíčové snímky (Key Frame). Každý snímek představuje nové plátno, na které je možné nakreslit obrázek. Spojením více obrázků za sebou a jejich následným přehráním vznikne dojem (iluze) animace. Pro animace je možné využít také funkci programu na doplnění pohybu, takzvaný Motion Tween. Při použití funkce Motion Tween se určí počáteční a koncová pozice objektu a program dopočítá a vytvoří snímky mezi počátečním a koncovým snímkem. Při použití funkce Motion Tween je nutné vložit takzvaný Key Frame. Vložení klíčového snímku je znázorněno na obrázku (obr.85) níže.



Obr. 85: Popis vložení klíčového snímku (Key Frame)

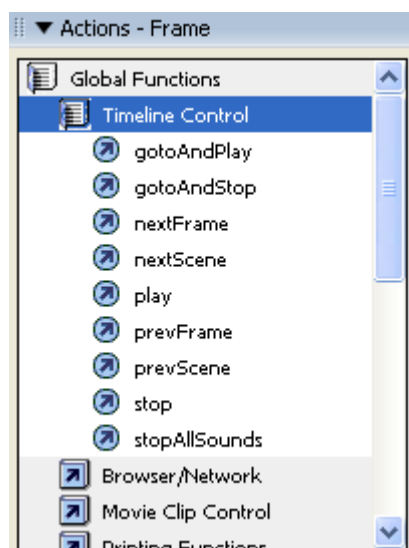
Dalším důležitým prvkem jsou vrstvy. Pomocí vrstev jsme schopni vytvořit na sobě nezávislé objekty a poté s těmito objekty můžeme lépe pracovat nebo je navzájem překrývat atd. Prvním krokem při práci s vrstvami je vytvoření nové vrstvy. Pro vytvoření nové vrstvy použijeme ikonku k tomu určenou a znázorněnou na obrázku (obr.86) níže. Mezi další možnosti práce s vrstvami patří možnost jejich uzamknutí. Tato možnost je užitečná hlavně proto, že její použití zabrání neúmyslnému manipulování s jinou vrstvou. Poslední možností je také nastavení viditelnosti jednotlivých vrstev.



Obr. 86: Možnosti práce s vrstvami

9.2.2. Možnosti interakce

Při vytvoření interaktivního prostředí animace bylo nutné využít záložku Actions, kde Macromedia Flash 8 nabízí některé funkce využitelné pro vytvoření interaktivního prostředí. Pro naše potřeby jsou použity funkce v záložce TimeLine Control. Tyto funkce jsou zobrazeny na obrázku (obr.87).

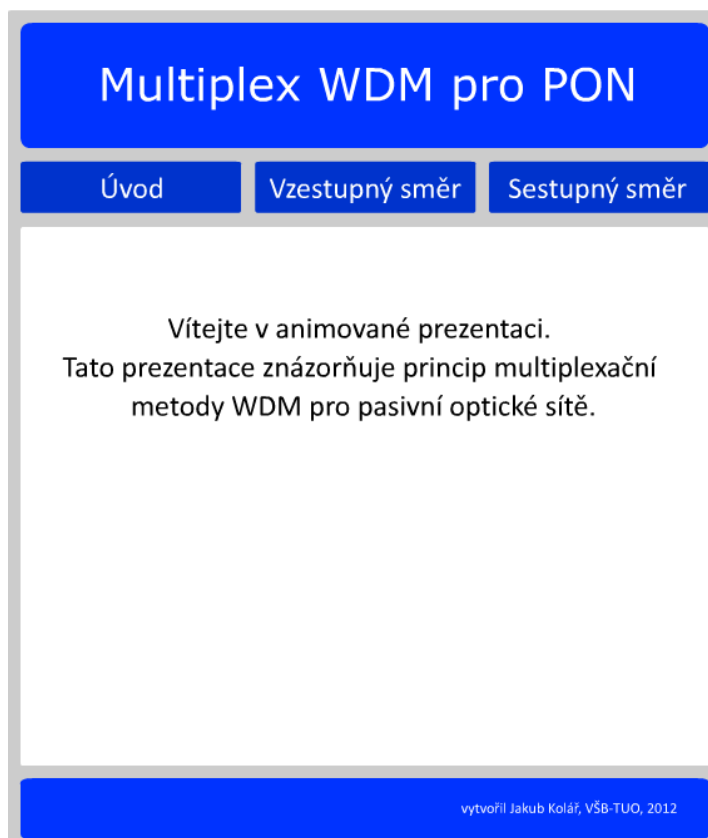


Obr. 87: Záložka Actions a nabídka položky TimeLine Control

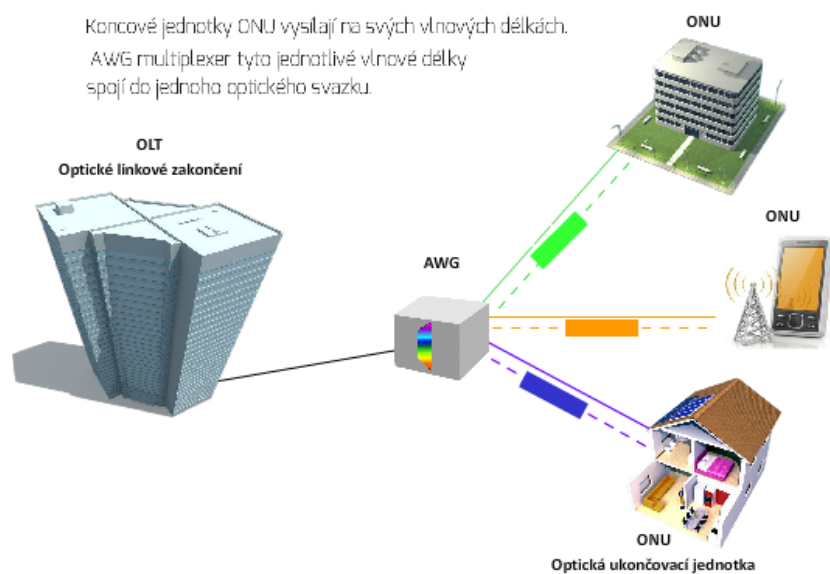
Při vytváření animací jsou použity funkce goto a stop. Funkce goto slouží pro přesunutí na klíčový snímek a zapnutí konkrétní animace po stisknutí tlačítka uživatelem. Funkce stop zabraňuje provedení přesunu na další animaci bez zásahu uživatele.

9.3. Animace WDM-PON

V této části jsou umístěny náhledy na úvodní obrazovku animace (obr.88) a také na samotné animace WDM-PON sítě (obr.89).



Obr. 88: Vzhled úvodní stránky animace



Obr. 89: Animace multiplexu WDM

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout WDM-PON síť a simulovat tuto síť s použitím různých druhů modulací. Při použití různých modulací zjišťovat a sledovat kvalitativní parametry. Při zvolení správné modulace v síti je možné navýšit jak překlenutou vzdálenost, tak i přenosovou rychlost.

První dvě části této bakalářské práce byly zaměřeny na teoretický rozbor. V této teoretické části práce byly detailně popsány jednotlivé prvky používané v optických sítích a také byly objasněny principy, jak tyto prvky fungují. Také byla detailně popsána WDM-PON síť a následně i její modifikace jako LR-PON, S-PON atd. V této části práce byl teoreticky popsán princip jednotlivých modulací. Pro vytvoření teoretické části práce bylo nutné čerpat z velkého množství literatury z různých oblastí.

V další části práce byla detailně popsána navržená WDM-PON síť. WDM-PON síť byla navržena v simulačním prostředí Optiwave Optisystem 10 podle rad a doporučení vedoucího bakalářské práce. Dále byly testovány jednotlivé modulace. Při tomto praktickém testování jednotlivých modulací byly ověřeny některé teoretické předpoklady z teoretické části. Díky simulacím byly odhaleny některé nevýhody jednotlivých modulací. Jako například větší citlivost na šum nebo nemožnost použít určité modulace pro dálkové přenosy. Při celkovém zhodnocení jednotlivých modulací dopadla duobinární modulace a modulace RZ-DPSK nejlépe ze všech testovaných modulací a to jak při testovaných přenosových rychlostech, tak i při použitých délkách vedení. Naopak modulace RZ 33% v porovnání s ostatními modifikacemi modulace RZ i v celkovém zhodnocení všech modulací dopadla nejhůře.

V poslední části této bakalářské práce byly vytvořeny animace multiplexu WDM. V těchto animacích byl graficky znázorněn princip WDM-PON sítě. Animace byly vytvořeny jak pro sestupný, tak i pro vzestupný směr. Pro vytvoření animací bylo použito vývojové prostředí Adobe Flash. Toto prostředí bylo ideální díky intuitivnímu ovládání a jednoduchosti vytvoření jednotlivých animací.

Do budoucna bych chtěl tuto práci nebo její části využít při vytváření diplomové práce. Také bych se chtěl věnovat simulaci složitějších modulačních formátů. Prakticky si ověřit jejich parametry a vlastnosti při různých přenosových rychlostech a vzdálenostech.

Seznam použité literatury:

- [1] BOHÁČ, Leoš. *Arrayed Waveguide Gratings* [online]. 2006 [cit. 2011-10-25]. Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2330>.
- [2] Lafata, P.: *Pasivní optické sítě WDM-PON*. Access server [online], Internet: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050004>. 2009, roč. 7. [cit. 2011- 21- 10]. ISSN 1214-9675.
- [3] RLC Praha a.s. [online]. 2005 [cit. 2011-10-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.rlc.cz/Produkty/WDM-SYSTEMS/O-xWDM/>>.
- [4] WDM SYSTEMS Summit 2012 [online]. 2010 [cit. 2011-10-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.wdmsummit.cz/nabidka/wdm-technologie/technologie-wwdm.htm>>.
- [5] MONTERO, Carlos Bock. Upgrade paths from existing copper-based access solutions to advanced agile wavelength-routed passive optical networks. Barcelona, 2006. 159 s. Rigorózní práce. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [6] SAFIBRA S.R.O. [online]. 2010 [cit. 2011-011-22]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/cesky/produkty/zesilovace/edfa.html>
- [7] BOHÁČ, Leoš. *Optické zesilovače v telekomunikační technice* [online]. 2009. 32 s. Přednáška. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4977>>.
- [8] GHATAK, Ajoy; THYAGARAJAN, K. *Introduction to fiber optics*. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 565 s. ISBN 0521571200.
- [9] Modulace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011-09-12 [cit. 2011-12-15]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Modulace>
- [10] DVORSKÝ, Marek. *Analogové modulace: Základní principy modulací* [pdf]. 2011-03-20. Ostrava, 2011 [cit. 2011-12-15].

- [11] ZHANG, Sen. *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System* [online]. Kansas [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: http://www.ittc.ku.edu/research/thesis/documents/sen_zhang_thesis.pdf. Master thesis. University of Kansas.

- [12] ADALID, Javier Cano. *Modulation Format Conversion in Future Optical Networks* [online]. Denmark, 2009 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7306/1/Format_conversion_javier_cano.pdf. Master thesis. Technical University of Denmark.

- [13] BOHÁČ, Leoš. *Metody v moderních přenosových systémech* [pdf]. 2010. vyd. ČVUT-FEL katedra telekomunikační techniky, 2010, 19 s. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz/cz/?s=vyuka&l=mat>

- [14] RAJAGOPAL, K. *Engineering Physics*. New Delhi : PHI Learning Private Limited, 2008. 339 s. ISBN 978-81-203-3286-7.

- [15] BOHÁČ, Leoš. *Optické komunikační systémy: 2.přednáška* [pdf]. 2010. vyd. ČVUT-FEL katedra telekomunikační techniky, 2010, 26 s. [cit. 2011-12-15]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz/cz/?s=vyuka&l=mat>

- [16] BOHÁČ, Leoš. *Optické zesilovače v telekomunikační technice* [online]. 2009. 32 s. Přednáška. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z WWW: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4977>>.

- [17] MIROSLAV, Filka. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. první. Brno : Centa, spol. s r. o., 2009. 371 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

- [18] TKÁČ, Petr. *Mach-Zehnderův interferometr jako modulátor pro optické komunikace* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/87162/TKA065_FEI_N2647_2601T013_2011.pdf?sequence=1. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Vladimír Vašínek.

- [19] BINH, Le Nguyen. *Digital optical communications*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 579 s. ISBN 14-200-8205-1.

- [20] KYSELÁK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy* [online]. Brno, 2008 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10290. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Miloslav Filka.
- [21] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [pdf]. 2006. vyd. 2006, 172 s. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [22] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika* [pdf]. Brno, 155 s. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/bc/Optoelektronika_S.pdf
- [23] GRYGÁREK, Petr. *Základní principy přenosu dat*. 2005. vyd. 2005, 50 s. Dostupné z: <http://www.cs.vsb.cz/grygarek/POS/lect/PREZENTACE/fyzPrincipy.pdf>
- [24] POBOŘIL, Radek. *Simulace flexibilní optické přístupové sítě* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/87433/POB031_FEI_B2647_2612R059_2011.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jan Látal.
- [25] KUCHAR, A. *Optické komunikace* [[online]]. 2009. vyd. 2009, 42 s. [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://space.fjfi.cvut.cz/web/blazej/bigfiles/opk.pdf>
- [26] Messung des Brechzahlprofils und der Numerischen Apertur von Lichtwellenleitern sowie Untersuchung von Übertragungseigenschaften von Multimode- und Singlemodefasern [pdf]. 2009, 12 s. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: http://www.hft.tu-berlin.de/uploads/media/Lichtwellenleiter_04.pdf
- [27] HUAN, Song, Mukherjee BISWANATH. *Long-Reach Optical Access* [pdf]. 2009. vyd. 2009, 17 s. [cit. 2012-01-10].
- [28] BANERJEE, Amitabha a Mukherjee BISWANATH. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: [pdf]. 2005. vyd. 2005, 22 s. [cit. 2012-02-10].
- [29] BISWANATH, Mukherjee. *Optical WDM networks*. New York: Springer, c2006, 953 s. ISBN 978-038-7290-553.

- [30] INTEC DESIGN. *Research and Development Activities on Passive Optical Networks*. 2011. vyd. 2011. Dostupné z: <http://www.intec.ugent.be/design/pon.php>
- [31] BOHÁČ, Leoš . Optické přenosové systémy X32OPS- : Základní stavební bloky optického přenosového systému [online]. Praha : ČVUT, 2010. 23 s. Referát. ČVUT. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz>>
- [32] Semiconductor optical amplifiers. BERNARD, Jean-Jacques. *SPIE* [online]. 2012 [cit. 2012-03-23]. Dostupné z: <http://spie.org/x26692.xml?ArticleID=x26692>
- [33] EXFO. Advanced Modulation Schemes and Impairments in 40 Gbit/s and 100Gbit/s Networks. Quebec, 2010.
- [34] Phase-shift keying. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012-03-23 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying
- [35] *Optiwave* [online]. [cit. 2012-04-06]. Dostupné z WWW: <<http://optiwave.com/>>.
- [36] HRBÁČEK, Jiří. *Flash 1: tvorba inteligentní grafiky*. 2007. vyd. Brno: MSD, 2007. ISBN 978-80-7392-000-5. Dostupné z: <http://boss.ped.muni.cz/hrbacek/Materialy/Flash1/Lekce1/index.htm>
- [37] TEJKAL, Vladimír. DVOUSTAVOVÉ MODULAČNÍ FORMÁTY V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* [online]. 2010, 4, [cit. 2012-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/84189/AEEE-2010-8-4-96-tejkal.pdf?sequence=1>>. ISSN 1804-3119.

Seznam zkratek

AM	(Amplitude modulation)
APD	(Avalanche - Photodiode)
APON	(ATM Passive Optical Network)
ASE	(Amplified Spontaneous Emission)
ASK	(Amplitude-shift Keying)
AWG	(Arrayed Waveguide Grating)
BER	(Bit Error Rate)
BPSK	(Binary Phase-shift Keying)
CO	(Central Office)
CRZ	(Chirped Return to Zero)
CSRZ	(Carrier-Suppressed Return to Zero)
CW	(Continuous Wave)
CWDM	(Coarse Wavelength Division Multiplex)
DB	(Duobinary)
DD	(Direct Detection)
DFB	(Distributed Feedback)
DPSK	(Differential Phase-shift Keying)
DQPSK	(Differential Quadrature Phase-shift Keying)
DWA	(Dynamic Wavelength Assignment)
DWDM	(Dense Wavelength Division Multiplex)
EAM	(ElectroAbsorption Modulator)
EDFA	(Erbium Doped Fiber Amplifier)
FM	(Frequency Modulation)
FPR	(Free Spectral Range)
FPR	(Free Propagation Region)
FTTH	(Fiber to the Home)
LD	(Laser Diode)
LED	(Light-emitting Diode)
LLID	(Logical Link Identity)
LR PON	(Long Reach Passive Optical Network)

MUX	(Multiplexer)
MZM	(Mach-Zehnder Modulator)
NRZ	(Non-return to Zero)
OLT	(Optical Line Terminal)
ONU	(Optical Network Unit)
OOK	(On-off Keying)
OSA	(Optical Spectrum Analyzer)
PD	(Photodiode)
PM	(Phase Modulation)
PON	(Passive Optical Network)
PRBS	(Pseudo-Random Bit Sequence)
PSK	(Phase-shift Keying)
QPSK	(Quadrature Phase-shift Keying)
RZ	(Return to Zero)
SOA	(Semiconductor Optical Amplifier)
TDM	(Time Division Multiplex)
TDMA	(Time Division Multiple Access)
VDSL	(Very High Speed Digital Subscriber Line)
WDM	(Wavelength Division Multiplex)
WWDW	(Wide Wavelength Division Multiplex)
XOR	(Exclusive OR)

Seznam obrázků

Obr. 1:	Typy zesilovačů [24].....	12
Obr. 2:	Schéma EDFA optického zesilovače [17].....	13
Obr. 3:	Principiální schéma znázorňující fungování EDFA optického zesilovače [6].....	13
Obr. 4:	Znázornění struktury zesilovače SOA [32].....	14
Obr. 5:	Graf znázorňující absorpci a pohltivost pro různé materiály detektorů [17].....	15
Obr. 6:	Princip fotodiody PIN [17].....	16
Obr. 7:	Princip fungování lavinové(APD) fotodiody [17]	17
Obr. 8:	Metody rozkladu světla [5]	18
Obr. 9:	Struktura AWG [1].....	19
Obr. 10:	Vlnovodělkový směrovač [1]	19
Obr. 11:	WDM-PON optická síť [5]	20
Obr. 12:	Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2 [2].....	22
Obr. 13:	Znázornění pásem DWDM [31].....	23
Obr. 14:	WDM s pevně přiřazenými vlnovými délkami [2]	24
Obr. 15:	WDM s využitím směrové odbočnice typu AWG místo pasivního rozbočovače [2] ..	25
Obr. 16:	Kaskádního zapojení AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů [2].....	25
Obr. 17:	WDM-TDM optická síť [5].....	27
Obr. 18:	LR-PON síť [30]	27
Obr. 19:	Schéma fungování SUPER PON sítě [27]	28
Obr. 20:	Základní schéma optického systému [22]	30
Obr. 21:	Detailní blokové schéma optického systému [22].....	30
Obr. 22:	Porovnání citlivosti nekoherentních a koherentních optických přijímačů [25].....	33
Obr. 23:	Elektro absorpční modulátor (EAM) [5].....	34
Obr. 24:	Princip Mach-Zehnderova modulátoru (MZM) [18].....	34
Obr. 25:	Mach-Zehnder optický modulátor (MZM) [26].....	35
Obr. 26:	Časový průběh AM DSB s plnou nosnou [10].....	36
Obr. 27:	Časový průběh AM DSB s potlačenou nosnou [10]	37
Obr. 28:	Časový průběh AM SSB s plnou nosnou [10]	37
Obr. 29:	Blokové schéma vysílače pro NRZ OOK [11].....	41
Obr. 30:	Znázornění amplitudy v čase pro modulaci NRZ-OOK [33].....	42
Obr. 31:	Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci NRZ-OOK [33].....	42

Obr. 32:	Blokové schéma RZ vysílače [11]	42
Obr. 33:	Obrázek zobrazující optickou intenzitu pro různé pulzní tvarovače [12]	43
Obr. 34:	Znázornění amplitudy v čase pro modulaci RZ-OOK [33].....	43
Obr. 35:	Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci RZ-OOK [33].....	43
Obr. 36:	Blokový diagram vysílače CS-RZ [11].....	44
Obr. 37:	CS-RZ generování signálu [11]	44
Obr. 38:	Schéma pro CRZ modulaci [13].....	45
Obr. 39:	Schéma pro duobinární modulaci [13].....	46
Obr. 40:	Znázornění amplitudy v čase pro modulaci BPSK [33].....	47
Obr. 41:	Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci BPSK [33].....	47
Obr. 42:	Znázornění amplitudy v čase pro modulaci QPSK [33].....	48
Obr. 43:	Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci QPSK [33]	48
Obr. 44:	Znázornění amplitudy v čase pro modulaci DQPSK [33].....	49
Obr. 45:	Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci DQPSK [33]	49
Obr. 46:	Znázornění amplitudy v čase pro modulaci DPSK [33].....	49
Obr. 47:	Znázornění konstelačního diagramu pro modulaci DPSK [33]	50
Obr. 48:	Obecné blokové schéma vysílače RZ-DPSK [11]	50
Obr. 49:	Detailnější znázornění tvorby RZ-DPSK modulace [19].....	51
Obr. 50:	Zobrazení DPSK prekodéru [19].....	51
Obr. 51:	Schéma NRZ-DPSK vysílače [11].....	52
Obr. 52:	Schéma NRZ-DPSK přijímače [11].....	52
Obr. 53:	Znázornění části pro modulaci signálu.....	56
Obr. 54:	Nastavení CW pole laserů.....	57
Obr. 55:	Nastavení WDM-Multiplexeru v části pro modulaci signálu (OLT jednotka)	57
Obr. 56:	EDFA zesilovač v programu Optiwave	58
Obr. 57:	Spektrální charakteristika na výstupu zesilovače EDFA	58
Obr. 58:	Přijímací část OLT jednotky	59
Obr. 59:	Nastavení AWG 8x8	60
Obr. 60:	Nastavení druhého AWG multiplexeru.....	61
Obr. 61:	Přenosová trasa.....	62
Obr. 62:	Prvky ONU jednotky.....	63
Obr. 63:	Diagram oka s vyznačenými parametry [37]	65
Obr. 64:	Schéma modulace NRZ.....	66

Obr. 65:	Nastavení Mach-Zehnderova modulátoru	66
Obr. 66:	Demodulace NRZ signálu	67
Obr. 67:	Schéma modulace RZ 33%	69
Obr. 68:	Nastavení MZM 1 pro modulaci RZ 33%.....	69
Obr. 69:	Nastavení sinusového generátoru při modulaci RZ 33%	70
Obr. 70:	Nastavení MZ modulátoru 2 pro modulaci RZ 33%.....	70
Obr. 71:	Schéma modulace RZ 50%	73
Obr. 72:	Nastavení sinusového generátoru pro modulaci RZ 50%	73
Obr. 73:	Schéma modulace CSRZ.....	76
Obr. 74:	Schéma modulace CRZ.....	78
Obr. 75:	Nastavení MZ modulátoru 3 pro modulaci CRZ.....	79
Obr. 76:	Schéma duobinární modulace	81
Obr. 77:	Nastavení MZ modulátoru pro duobinární modulaci	82
Obr. 78:	Schéma modulace NRZ-DPSK	84
Obr. 79:	Nastavení MZ modulátoru pro modulaci NRZ-DPSK.....	85
Obr. 80:	Schéma demodulace signálu pro modulaci NRZ-DPSK.....	85
Obr. 81:	Schéma modulace RZ-DPSK	87
Obr. 82:	Nastavení MZ modulátoru 2 pro modulaci RZ-DPSK.....	88
Obr. 83:	Popis prostředí programu Macromedia Flash 8 [35].....	91
Obr. 84:	Vytváření vrstev a časová osa v programu Macromedia Flash 8.....	92
Obr. 85:	Popis vložení klíčového snímku (Key Frame)	92
Obr. 86:	Možnosti práce s vrstvami	93
Obr. 87:	Záložka Actions a nabídka položky TimeLine Control	93
Obr. 88:	Vzhled úvodní stránky animace	94
Obr. 89:	Animace multiplexu WDM.....	95

Seznam tabulek

Tab. 1:	Parametry vlákna G.652 C/D	60
Tab. 2:	Hodnocení kvality signálu podle hodnoty Q faktoru	65
Tab. 3:	Výsledky simulací pro modulaci NRZ při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s.....	67
Tab. 4:	Výsledky simulací pro modulaci NRZ při přenosové rychlosti 10 Gb/s.....	68
Tab. 5:	Výsledky simulací pro modulaci RZ 33% při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s	71
Tab. 6:	Výsledky simulací pro modulaci RZ 33% při přenosové rychlosti 10 Gb/s	72
Tab. 7:	Výsledky simulací pro modulaci RZ 50% při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s	74
Tab. 8:	Výsledky simulací pro modulaci RZ 50% při přenosové rychlosti 10 Gb/s	75
Tab. 9:	Výsledky simulací pro modulaci CSRZ 67% při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s	77
Tab. 10:	Výsledky simulací pro modulaci CSRZ 67% při přenosové rychlosti 10 Gb/s	77
Tab. 11:	Výsledky simulací pro modulaci CRZ při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s.....	80
Tab. 12:	Výsledky simulací pro modulaci CRZ při přenosové rychlosti 10 Gb/s.....	80
Tab. 13:	Výsledky simulací pro modulaci DB při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s	83
Tab. 14:	Výsledky simulací pro modulaci DB při přenosové rychlosti 10 Gb/s	83
Tab. 15:	Výsledky simulací pro modulaci NRZ-DPSK při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s	86
Tab. 16:	Výsledky simulací pro modulaci NRZ-DPSK při přenosové rychlosti 10 Gb/s	86
Tab. 17:	Výsledky simulací pro modulaci RZ-DPSK při přenosové rychlosti 1.25 Gb/s.....	89
Tab. 18:	Výsledky simulací pro modulaci RZ-DPSK při přenosové rychlosti 10 Gb/s.....	89

Seznam příloh

[Příloha A]	Kompletní výsledky ze simulací pro jednotlivé modulace – umístěny na CD
[Příloha B]	Soubory s jednotlivými modulacemi navrženy v programu Optiwave Optisystem 10 – umístěny na CD
[Příloha C]	Animace multiplexu WDM – umístěna na CD